

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

DÉVELOPPEMENT ET ANALYSE DES CRITÈRES DE VULNÉRABILITÉ DES
POPULATIONS SAHÉLIENNES FACE À LA VARIABILITÉ DU CLIMAT : LE CAS
DE LA RESSOURCE EN EAU DANS LA VALLÉE DE LA SIRBA
AU BURKINA FASO

THÈSE
PRÉSENTÉE
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DU DOCTORAT EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR
FANTA MARA

OCTOBRE 2010

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS.....	vii
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES FIGURES	xiv
LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES.....	xix
RÉSUMÉ.....	xxii
INTRODUCTION	1
CHAPTIRE I	
ÉTAT DES CONNAISSANCES	6
1.1 Définition générale et concept de vulnérabilité	6
1.2 Approches utilisées en évaluation de la vulnérabilité	9
1.2.1 Approches utilisées en sciences du climat	9
1.2.2 Approches utilisées en sciences sociales.....	10
1.3 Facteurs environnementaux de la vulnérabilité	13
1.3.1 Facteurs climatiques	13
a) Variabilité historique observée à l'échelle globale et continentale	15
b) Variabilité historique observée à l'échelle régionale	16
c) Contexte local de la variabilité du climat	17
d) Changements anticipés au cours du 21 ^{ème} siècle à l'échelle globale.....	18
e) Changements anticipés à l'échelle régionale.....	18
1.3.2 Facteurs humains	20
1.4 Étude de cas	21
1.5 Outils d'évaluation de la vulnérabilité	22
CHAPITRE II	
MÉTHODOLOGIE	24
2.1 Géographie du bassin de la Sirba.....	24
2.1.1 Géologie, géomorphologie et biogéographie du bassin	26
2.1.2 Climat.....	28
2.1.3 Hydrographie.....	30
2.2 Méthodologie	31

2.2.1 Démarche utilisée pour la caractérisation de la zone d'étude	32
2.2.2 Acquisition des données.....	32
a) Collecte des données au Centre Régional AGRHYMET au Niger	34
b) Collecte des données au Burkina Faso.....	34
c) Enquête sur le terrain	35
2.2.3 Données et méthodes de traitement	37
2.2.3.1 Description des données climatiques	37
2.2.3.2 Méthodes de traitement et d'analyse des données climatiques	39
a) Définition et calcul des indices de précipitations	39
b) Analyse de la variabilité interannuelle	41
c) Distribution intra-saisonnière et variabilité des cumuls mensuels de précipitations	41
d) Calcul des tendances	42
2.2.3.3 Description des données hydrologiques	43
2.2.3.4 Méthodes de traitement et analyse de l'écoulement saisonnier de la Sirba.....	44
2.2.3.5 Description des données environnementales.....	46
2.2.3.6 Traitement des données environnementales.....	48
2.2.3.7 Description des données socio-économiques et infrastructures publiques.....	50
2.2.3.8 Traitement des données socio-économiques et démographiques	51
a) Données socio-économiques	51
b) Données démographiques	52
c) Données d'inventaire des infrastructures socio-institutionnelles	53
2.2.4 Croisement des données.....	53
2.2.4.1 L'Analyse en Composantes Principales (ACP).....	54
a) Identification des dimensions de la vulnérabilité	55
b) Sélection des indicateurs	57
c) Standardisation et agrégation des indicateurs.....	59
d) Génération des items et purification de la matrice	59
2.2.4.2 Classification des critères.....	61
CHAPITRE III	
RÉSULTATS : ANALYSE DES DONNÉES ENVIRONNEMENTALES	63
3.1 Analyse du régime de précipitations moyen annuel.....	63
3.1.1 Le climat moyen	63
a) Normale climatique 1961-1990 et 1971-2000 sur l'ensemble du bassin	65
b) Variabilité interannuelle sur la période 1961-2004	66

3.1.2 Distribution mensuelle de précipitations (d'avril à octobre)	69
a) Normales climatiques 1961-1990 de la distribution des pluies mensuelles	70
b) Variabilité des contributions des précipitations mensuelles pour les années 1984, 1994 et 2004	71
3.1.3 Caractéristiques des indices de précipitations.....	75
a) Normales climatiques 1961-1990	75
b) Variabilité interannuelle des indices pluviométriques sur la période 1961-2004	76
c) Variabilité intra-saisonnière des indices pluviométriques d'avril à octobre	85
a) Précipitations moyennes annuelles.....	90
a) Indices pluviométriques	91
3.2 Influence des fluctuations du régime de précipitations sur les ressources en eau	92
3.2.1 Variabilité interannuelle des écoulements standardisés.....	92
3.2.2 Variabilité intra-saisonnière des écoulements	94
3.2.3 Disponibilité des ressources en eau	96
3.3 Portrait environnemental	98
3.3.1 Variation interannuelle des indices de végétation	98
3.3.2 Évolution saisonnière des indices de végétation	99
3.3.3 Changements observés dans l'occupation des terres entre 1989 et 1999	101
3.3.4 Qualité d'eau	106
a) Propriétés physicochimiques.....	106
b) Pollution de l'eau par les micro-organismes	107
3.3.5 Maladies hydriques : cas du District sanitaire de Boulssa	109
CHAPITRE IV	
ANALYSE DES CARACTÉRISTIQUES SOCIO-ÉCONOMIQUES ET	114
CAPACITÉS SOCIO-INSTITUTIONNELLES	114
4.1 Caractéristiques économiques.....	114
4.1.1 Pratiques agricoles	114
a) Le système de jachère	116
b) Le Zaï	117
c) Association des cultures	117
4.1.2 Évolution de la production céréalière de 1984 à 2004.....	118
4.1.3 Élevage.....	120
4.1.4 Autres activités	121
4.1.5 Couverture des besoins alimentaires.....	121

4.1.6 Vulnérabilité des activités agropastorales des populations face à la récurrence de la sécheresse..	122
4.2 Bien-être social	124
4.2.1 Aspects sociodémographiques	124
4.2.2 Pauvreté.....	125
4.2.3 Éducation	126
4.2.4 Santé	127
4.2.5 Infrastructures hydrauliques	128
a) Besoins en eau de la population et capacité d'approvisionnement.....	130
b) Accessibilité des points d'eau	133
c) Couverture en eau des cultures et du cheptel	134
CHAPITRE V	
DÉVELOPPEMENT ET ANALYSE DES CRITÈRES DE VULNÉRABILITÉ	137
5.1 Résultats d'analyse des données par la corrélation non paramétrique de Spearman	137
5.2 Résultats et interprétation de l'Analyse en Composantes Principales	146
5.2.1 Résultats pour l'année 1984.....	148
5.2.2 Résultats pour l'année 1994.....	151
5.2.3 Résultats pour l'année 2004.....	153
5.3 Analyse spatiale de la vulnérabilité pour les trois années : 1984, 1994 et 2004.....	155
5.3.1 Vulnérabilité des provinces aux critères : «Condition environnementale et capacité de réponse», «Disponibilité des ressources en eau» et «Disponibilité en eau potable» en 1984	163
5.3.2 Vulnérabilité des provinces aux critères : «Condition structurelle qualité de l'environnement», «Condition environnementale et capacité de réponse» et «Disponibilité en eau potable» en 1994	163
5.3.3 Vulnérabilité des provinces aux critères : «Condition environnementale et capacité de réponse», «Disponibilité des ressources en eau» et «Couverture des besoins en eau potable» en 2004	164
5.4 Discussion	165
5.4.1 Analyse de la vulnérabilité au critère «Condition environnementale et capacité de réponse»	165
a) Phénomène de dégradation des conditions environnementales	166
b) Effet de la variabilité climatique sur la vulnérabilité des populations	167
c) Effet de la pression anthropique sur la vulnérabilité des populations	168
5.4.2 Capacité de réponse et vulnérabilité structurelle des populations	169
5.2.3 Analyse de la vulnérabilité à la disponibilité des ressources en eau	170
CONCLUSION	172
RECOMMANDATIONS	176

1. Renforcement de capacité de recherche	176
2. Adoption des stratégies de gestion des risques	177
a) Sur le plan environnemental	177
b) Sur le plan agricole	177
c) Sur le plan socio-économique	178
3. Renforcement de la capacité institutionnelle	178
RÉFÉRENCES	180
ANNEXE A : QUESTIONNAIRE	196
ANNEXE B :	198
MÉTHODE DE CALCUL DES INDICES ET DÉTECTION DES TENDANCES	198
ANNEXE C	200
CUMUL MOYEN MENSUEL DE PRÉCIPITATIONS (mm) SUR LA PÉRIODE 1961-2004 (SOURCE : MÉTÉOROLOGIE DU BURKINA FASO)	200
ANNEXE D : MOYENNES MENSUELLES DES INDICES PLUVIOMÉTRIQUES CALCULÉS D'AVRIL À OCTOBRE SUR LA PÉRIODE 1961-2004	218
ANNEXE E	235
DONNÉES HYDROLOGIQUES	235
ANNEXE F	240
INDICES NORMALISÉS DE VÉGÉTATION POUR LA PÉRIODE	240
1990-1999	240
ANNEXE G	241
UNITÉ DE BÉTAIL PAR HECTARE (1970-2004)	241
ANNEXE H	242
STATISTIQUES AGRICOLES	242
ANNEXE I	245
INDICATEURS DE VULNÉRABILITÉ	245

AVANT-PROPOS

La vulnérabilité des populations constitue le facteur le plus négatif des changements climatiques à l'échelle de la planète. Le déficit hydrique que connaissent de nos jours les régions arides et semi-arides correspond à une succession d'années majoritairement déficitaires et à la mauvaise gestion que les communautés ont toujours appliquée à leur terroir en général et aux ressources en eau en particulier. Ces problèmes environnementaux sont de nos jours au nombre des priorités mondiales et en particulier dans les pays sahéliens comme le Burkina Faso et le Niger. Depuis plus de trois décennies des projets d'origines diverses, allant dans le sens de l'adaptation aux changements environnementaux et d'une gestion judicieuse des ressources naturelles se multiplient dans ces pays. C'est le cas du Projet d'Appui aux Capacités d'Adaptation aux Changements Climatiques dans les pays du CILSS. Ce projet, comme tant d'autres initiatives engagées par un nombre important d'institutions environnementales nationales, internationales, pour être efficace doit se focaliser sur les aspects fondamentaux qui sont à la base de la vulnérabilité des populations sahéliennes à la variabilité climatique. La complexité du concept de vulnérabilité (vulnérabilité conjoncturelle, telle que la sécheresse récurrente liée à la variabilité du climat et structurelle intrinsèque au système humain) et la multiplicité des facteurs de vulnérabilité des populations sont autant de raisons qui nous ont animé dans le choix de ce thème.

Ce projet «Développement et analyse des critères de vulnérabilité des populations Sahéliennes face à la variabilité du Climat : le cas des ressources en eau dans la vallée de la Sirba au Burkina Faso» représente le couronnement de mes études doctorales à l'Institut des Sciences de l'Environnement de l'Université du Québec à Montréal. Les critères de vulnérabilité développés constituent un ensemble de caractéristiques environnementales et socio-économiques inter-reliées qui favorisent une meilleure compréhension de la vulnérabilité des populations sahéliennes. C'est aussi un outil d'aide dans le but de promouvoir les stratégies d'adaptation. Un tel document n'aurait pu être réalisé sans la

contribution des personnes qui, de près ou de loin, m'ont aidée, accompagnée, encouragée et soutenue tout au long de mes recherches.

Si ce travail a du mérite, je le dois à la rigueur et à des critiques pertinentes de mes Directeurs de thèse, les professeurs Yves Baudouin, Philippe Gachon et Laurent Lepage. En plus de leur qualité de directeurs, ils ont su stimuler ma curiosité scientifique et porter ce projet à terme. Aussi, ce travail n'aurait vu le jour sans leur confiance, leurs conseils précieux et leurs soutiens matériels et financiers constants. Leur implication, ainsi que l'amitié qu'ils m'ont portée vont bien au-delà du simple rôle de directeurs de thèse, qu'ils reçoivent l'expression de toute ma gratitude.

Mes remerciements s'adressent également à tout le collectif professoral de l'Institut des Sciences de l'Environnement de l'UQAM pour la qualité de la formation et le bon encadrement. C'est le lieu de remercier Madame Lucie Brodeur, Assistance de la gestion, du Programme de Doctorat en Sciences de l'Environnement, pour sa disponibilité, ses conseils qui m'ont guidée dans l'accomplissement des formalités administratives nécessaires au programme de doctorat de l'Institut. Que les professeurs du Département de géographie reçoivent mes remerciements sincères, particulièrement la professeure Michelle Garneau, ainsi que le personnel de soutien André Parent et Bertrand Touchette dont les supports techniques n'ont pas fait défaut. Mes reconnaissances vont également à Mesdames Denise Thiboutot Dubois et Christiane Parent pour leur disponibilité et les innombrables services qu'elles m'ont rendus. Mes remerciements sincères s'adressent aussi au professeur Jean Pierre Schmit pour son appui qui a conduit à la validation de mon admission au programme de doctorat en Sciences durant les premiers moments de mes études doctorales.

C'est l'occasion pour moi d'exprimer ma gratitude à l'Agence Canadienne de Développement International (ACDI) et au personnel du Programme Canadien des Bourses de la Francophonie à Ottawa (PCBF) pour le soutien financier consenti dans ma formation. Je réitère mon engagement à m'impliquer de façon active dans le processus de développement de mon pays, la Guinée et des pays de la Sous Région Ouest Africaine à travers la formation et la sensibilisation dans le domaine des changements climatiques et ses effets sur les systèmes environnementaux et humains. Je remercie le Gouvernement guinéen et plus

particulièrement le Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche Scientifique de me libérer de mes charges de cours, afin de me consacrer à mes études doctorales.

Un remerciement spécial à la Direction du Projet d'Appui aux capacités d'adaptation aux changements climatiques à travers lequel j'ai bénéficié de la collaboration entre le Centre Régional AGRHYMET, Environnement Canada et l'Université du Québec à Montréal, via une contribution de l'Agence Canadienne de Développement International. En plus de l'accès aux données, le Directeur Monsieur Afouad du Centre Régional AGRHYMET m'a accueillie dans son institution en m'accordant tout son soutien moral, financier et matériel sans lesquels ma mission d'enquête et de collecte de données au Niger et au Burkina Faso n'aurait pas atteint les objectifs visés. Que Messieurs N'Djafa Ouaga, Coordonateur du Projet d'Appui aux capacités d'adaptation et Mathieu Badolo qui ont œuvré pour la bonne marche de ma collecte reçoivent mes remerciements les plus sincères. Mes reconnaissances s'adressent à l'ensemble des cadres du Centre AGRHYMET et particulièrement au Dr. Abou Amani dont la pertinence scientifique a permis d'orienter ma recherche vers des cibles susceptibles de m'aider dans la définition des critères. Mes reconnaissances vont également à Monsieur Alassane Diallo Directeur de la Météorologie du Burkina Faso ainsi qu'à son épouse Claudine pour leur hospitalité durant mon séjour, sans oublier les chefs de division et tous les autres travailleurs de la Direction.

La collecte de données a été réalisée avec la collaboration des stagiaires dont Mai Moussa Mourima et Mohamed Hamattan de l'Unité Méthodes et Application et Zoumana de l'Unité Gestion des Ressources Naturelles/Lutte contre la Désertification, qui m'ont été d'un apport inestimable durant tout le temps de ma collecte au Centre AGRHYMET; que ces jeunes trouvent mes sincères remerciements pour les efforts qu'ils ont déployés pour la réussite de cette collecte. De plus, ce travail a été réalisé en compagnie de mes collègues Karim Samoura, Jean-Clément, Dan Lansana Kourouma, Dembélé, Malike et Aïssata qui m'ont entourée de leur soutien constant pour parfaire ce travail. J'exprime ma profonde gratitude à Madame et Monsieur Paterson pour l'amitié et la sympathie dont ils ont fait preuve pendant les moments passés en leur compagnie.

J'exprime ma profonde gratitude à tous mes parents vivant au Canada qui ont mis tout en œuvre pour me faire oublier les soucis quotidiens de la vie. Il s'agit particulièrement de Mamadi Cissé et sa femme Adama Diakité, de mon neveu Lanciné et sa femme Mariam leurs trois enfants Mohamed, Fatouma et Nènè, Abdourahaman, Karima et son mari ainsi de leur fille Kinza. Mes reconnaissances vont à mes frères: El Hadj Moussa, Souleymane, Lanfia, Mamadi, Rassoul, N'Famba et Sangaré et mes sœurs Tèninken, Sarangbè, N'Tènin Hawa et ma grande soeur Assa qui ont bien voulu veiller sur ma famille durant mon séjour au Canada. Mes sincères remerciements vont à mes chères amies Koria, Aminata Sanoh, Tady Condé et la petite Saran Camara avec lesquelles je partage les moments de peine et de joie, trouvent ma profonde gratitude. Je remercie mes enfants et petits enfants Dianka, N'Faly, Moussa, Lonceny, Mohamed N'Toman, Félémetou, Kankou et Lanciné pour leur sagesse durant mon absence.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau.	Page
2.1 Températures (en °C) moyennes mensuelles maximales (Tmax), minimales (Tmin) et moyennes (Tmoy) à Dori et à Fada N’Gourma sur la période 1961-1990....	29
2.2 Humidité relative maximum, minimum et moyenne (en %) et évapotranspiration moyenne (en mm) mensuelle à Dori et à Fada N’Gourma sur la période 1961-1990. .	29
2.3 Récapitulatif de l’ensemble des données par catégorie, type d’informations, échelle spatiale et temporelle et leur provenance.....	36
2.4 Localisation des stations météorologiques et pourcentage de valeurs manquantes de précipitations quotidiennes sur la période d’analyse de 1961 à 2004.....	38
2.5 Liste des indices pluviométriques.....	40
2.6 Localisation des stations limnométriques utilisées et pourcentage de valeurs manquantes sur la période d’analyse de 1970 à 2002	43
2.7 Superficie des polygones et coefficients de Thiessen selon les stations.....	45
2.8 Données environnementales et cartographiques utilisées.....	47
2.9 Données socio-économiques et démographiques collectées auprès des institutions au Niger et au Burkina Faso et lors des entrevues organisées en 2005.	51
2.10 Récapitulatif des facteurs et indicateurs de vulnérabilité identifiés après traitement et analyse de l’ensemble des données en 1984, 1994 et 2004.	58
3.1 Moyenne annuelle de précipitations cumulées établie sur les périodes 1961-1990 et 1971-2000 pour l’ensemble des stations du bassin de la Sirba.....	65
3.2 Contribution (%) des quantités moyennes mensuelles de précipitations au cumul moyen annuel des années 1984, 1994 et 2004 par rapport à la moyenne normale 1961-1990 pour les stations de Fada N’Gourma, Bogandé et Aribinda.	74
3.3 Normales climatiques 1961-1990 des indices pluviométriques moyens mensuels entre avril et octobre pour l’ensemble des 17 stations du bassin.....	75

3.4	Tendance statistiquement significative des indices pluviométriques selon les 17 stations du bassin de la Sirba au seuil de 99 et 95 % (taux de Kendall, $H \neq 0$) calculée sur la période la période 1961-2004.	88
3.5	Tendance statistiquement significative des indices pluviométriques selon les 17 stations du bassin de la Sirba au seuil de 95 % (Pente de Sen $\neq 0$) sur la période 1961-2004.	89
3.6	Caractéristiques des eaux souterraines du bassin de la Sirba.	97
3.7	Matrice de confusion des images Landsat 5 (1989) et Landsat 7 (2001) et pourcentage de pixels classifié par code	102
3.8	Évolution du nombre de bétail par hectare sur l'ensemble du bassin de 1989-2001 ...	105
3.9	Résultats d'analyses des eaux de forage (A) et de surface (B) du bassin de la Sirba, avril 2005.	108
3.10	Cas de maladies hydriques enregistrés au cours des années 2001, 2002, 2003, 2004 et 2005 dans le Département de Boulsa.	111
4.1	Résultat d'analyse par régression : indices pluviométriques et production céréalière par habitant par province pour la période 1984-2004.	118
4.2	Synthèse des enjeux liés à la variabilité saisonnière, annuelle et interannuelle des précipitations et leurs impacts sur les activités agropastorales en 2005 sur le bassin de la Sirba.	123
4.3	Structure par grand groupe d'âge de la population par province.	125
4.4	Indices sociaux	128
4.5	Situation des points d'eau sur le bassin de la Sirba en 2004.	129
4.6	Besoins en eau pour la population et le cheptel par province en 2004	131
4.7	Couverture en infrastructures hydrauliques et couverture en eau potable des populations du bassin de la Sirba par province en 2004.	132
4.8	Accessibilité à l'eau potable dans les villages de Namentenga, Gnagna et Say en 2005	134
5.1	Récapitulatif des indices retenus après réduction des matrices selon les années.	142
5.2	Indices calculés et retenus après application de la corrélation non paramétrique de Spearman par province en 1984.	143

5.3	Idem au tableau 5.2 mais en 1994	143
5.4	Idem au tableau 5.2 mais en 2004.	144
5.5	Matrice des valeurs de corrélation pour l'année 1984, utilisant une rotation Oblimin de l'échantillon, les valeurs en gras sont significativement différentes de 0, au seuil de 95 % ($\alpha = 0,05$).....	144
5.6	Idem au tableau 5.5 mais en 1994	145
5.7	Idem au tableau 5.5 mais en 2004.	145
5.8	Qualité de représentation des indices.....	146
5.9	Variance expliquée par le modèle pour les échantillons de 1984, 1994 et 2004.	147
5.10	Répartition des indices des trois premières composantes de l'ACP en 1984.	149
5.11	Idem au tableau 5.10 mais pour l'année 1994.	151
5.12	Idem au Tableau 5.10 mais pour l'année 2004.....	153
5.13	Contribution factorielles ou poids respectifs des critères par province selon les années 1984, 1994, et 2004.	156
5.14	Classification selon trois groupes de vulnérabilité : faible (1), moyen (2) et élevée (3) des provinces selon les trois années 1984, 1994 et 2004.	156

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
1.1 Schéma conceptuel de la vulnérabilité adapté de Füssel et Klein (2002).....	8
1.2 Augmentation des températures moyennes mesurées selon les projections du GIEC (2007) sur le continent africain par rapport à la normale climatique 1961-1990.	19
1.3 Changements du régime de précipitations moyennes annuelles par rapport à la normale climatique 1961-1990 en Afrique selon les projections du GIEC (2007).	20
2.1 Localisation du bassin de la Sirba au Burkina Faso et au Niger.....	25
2.2 Division administrative du bassin de la Sirba selon les différentes provinces.	26
2.3 Carte d'altitude (en m) établie à partir du modèle numérique de terrain de la Sirba.....	27
2.4 Réseau hydrographique du bassin de la Sirba.	31
2.5 Schéma méthodologique.....	33
2.6 Localisation des stations pluviométriques et hydrologiques.	38
2.7 Polygone de Thiessen et superficies élémentaires dans le bassin de la Sirba.....	44
2.8 Construction des indicateurs et indices.....	56
3.1 Zone climatique et pluviométrie moyenne annuelle sur le bassin de la Sirba.	64
3.2 Évolution des anomalies standardisées (par l'écart-type), par rapport à la normale de 1961-1990, de la précipitation moyenne annuelle pour la période 1961-2004 dans la zone soudanienne, la zone nord soudanienne et la zone sahélienne	66
3.3 Idem qu'à la figure 3.2 mais pour les principales stations de Zorgho, Fada N'Gourma, Koupela, Boulssa, Bogandé, Piela, Barsalogho, Say, Sebba, Aribinda, Kollo, Téra.....	67
3.4 Distribution intra-saisonnière des précipitations moyennes mensuelles d'avril à octobre sur la période 1961-1990 des stations de Fada N'Gourma, Bogandé et Aribinda représentant les trois régions suggérées dans la figure 3.1.	71

3.5	Distribution intra-saisonnière des précipitations moyennes mensuelles d'avril à octobre en 1984 des stations de Fada N'Gourma, Bogandé et Aribinda représentant les trois régions.....	72
3.6	Idem qu'à la figure 3.5 mais pour l'année 1994	72
3.7	Idem qu'à la figure 3.5 mais pour l'année 2004.....	73
3.8	Anomalies interannuelles normalisées par l'écart-type pour chaque indice par rapport à la normale climatique 1961-1990 sur la station de Fada N'Gourma dans la zone soudanienne	77
3.9	Idem à la figure 3.8 mais pour la station de Bogandé, zone nord soudanienne.....	78
3.10	Idem à la figure 3.8 mais pour la station de Aribinda, zone sahélienne du bassin de la Sirba.....	79
3.11	Idem à la figure 3.8 mais pour les stations de Zorgho et Koupela.....	80
3.12	Idem à la figure 3.8 mais pour les stations de Boulsa et Barsalogho.....	81
3.13	Idem à la figure 3.8 mais pour les stations de Sebba et Kollo.....	82
3.14	Idem à la figure 3.8 mais pour les stations de Say et Téra.....	83
3.15	Histogrammes mensuels du cumul total de précipitations (mm/mois), de l'écart-type mensuel (mm/jour), de la fréquence de jours humides, et du maximum de jours consécutifs secs (jour) pour les stations de Fada N'Gourma, Bogandé et Aribinda. La moyenne climatologique des indices est calculée pour la période 1961-1990.....	86
3.16	Idem à la figure 3.8 mais pour l'intensité de précipitations par jour, le 90 ^e centile de précipitation le maximum de précipitations en trois jours consécutifs et le maximum de jours de précipitations supérieur au 90 ^e centile.	87
3.17	Pourcentage du nombre total de stations présentant des tendances significatives positives et négatives au seuil de 95 % (pente de Sen \neq 0) sur la période 1961-2004...	90
3.18	Évolution de la précipitation moyenne pondérée par la méthode de Thiessen sur l'ensemble du bassin (rouge) et Lamé d'eau écoulée de la Sirba à Garbé-Kourou (bleue), standardisées par l'écart-type par rapport à la moyenne 1963-1990.....	93
3.19	Évolution du débit moyen standardisé de la Faga à Liptougou par rapport à la moyenne 1973-1990 et de la pluviométrie moyenne standardisée à la station de Bogandé.....	93
3.20	Évolution intra-saisonnière de l'écoulement à Garbé-Kourou à l'embouchure de la Sirba avec le Niger et des précipitations à Bogandé en 1968.....	95

3.21	Évolution intra-saisonnière de l'écoulement à Garbé-Kourou à l'embouchure de la Sirba avec le Niger et des précipitations à Bogandé en 1988.	95
3.22	Disponibilité annuelle en eau par province et par habitant en 2004 sur le bassin de la Sirba	97
3.23	Évolution interannuelle des moyennes mensuelles de l'indice normalisé de végétation (NDVI) sur l'ensemble du bassin de la Sirba de mai à décembre pour la période 1990-1999.	99
3.24	Distribution saisonnière des indices normalisés de végétation (NDVI) extraits à partir des images NOAA et de la précipitation moyenne mensuelle moyennée spatialement sur le bassin sur la période 1990-1999.	100
3.25	Distribution spatiale de l'indice normalisé de végétation en août : 1997 sur le bassin de la Sirba. Source : image NOAA	101
3.26	Occupation du sol du bassin de la Sirba à l'aide d'image Landsat 7 (A) : août 1989 et (B) : août 2001. (Source : Image Landsat 7 Centre Régional AGRHYMET, 2004)... ..	103
3.27	Comparaison entre occupation du sol en 1989 et 2001 selon les types d'occupation du sol.	104
3.28	Unité de culture et du bétail par hectare selon les provinces.	105
3.29	Puits à grand diamètre utilisé pour l'abreuvement du cheptel et puits traditionnel utilisé pour les besoins domestiques dans le village Nianga département de Boulsa au Burkina Faso.	110
3.30	Évolution des maladies hydriques à Boulsa entre 2001-2005.	112
3.31	Évolution des précipitations moyennes mensuelles à la station de Boulsa pour les années 2001 à 2004.	112
4.1	Anomalies standardisées par rapport à l'écart-type 1984-2004 des indices pluviométriques moyens mensuels (d'avril à octobre), et de la production agricole par habitant pour la période 1984-2004 pour les stations de Fada N'Gourma, Zorgho, Bogandé et Aribinda	119
4.2	Évolution des installations de forages dans le bassin de la Sirba	130
4.4	Rizière sur la plaine de la Sirba à Piela.	135
4.5	Utilisation multiple de l'eau : Rizière à Nianga barrage abreuvoir du cheptel.....	136

5.1	Corrélation non paramétrique de Spearman entre les indices des dimensions climatiques (1), environnementales (2) et économiques (3) au seuil de 95 % en 1984.	138
5.2	Idem à la figure 5.1 mais en 1994.....	138
5.3	Idem à la figure 5.1 mais en 2004.....	139
5.4	Graphique des valeurs propres et du pourcentage de variance expliquée par composantes principales, et selon les trois structures factorielles de 1984, 1994 et 2004.	148
5.5	Projection des indices sur les deux premiers axes factoriels en 1984.....	149
5.6	Idem à la figure 5.5 mais pour l'année 1994	152
5.8	Pourcentage de provinces vulnérables aux critères : «Condition environnementale et capacité de réponse», «Disponibilité des ressources en eau» et «Disponibilité en eau potable» en 1984.	157
5.9	Carte de vulnérabilité des provinces au critère «Condition environnementale et capacité de réponse» en 1984.	157
5.10	Carte de vulnérabilité des provinces au critère «Disponibilité des ressources en eau» en 1984.	158
5.11	Carte de vulnérabilité des provinces au critère «Disponibilité en eau potable en 1984».	158
5.12	Pourcentage de provinces vulnérables aux critères : «Condition structurelle et qualité de l'environnement»; «Condition environnementale et capacité de réponse» et «Disponibilité en eau potable» en 1994.	159
5.13	Carte de vulnérabilité des provinces au critère «Condition structurelle et qualité de l'environnement» en 1994.	159
5.14	Carte de vulnérabilité des provinces au critère «Condition environnementale et capacité de réponse » en 1994	160
5.15	Carte de vulnérabilité des provinces au critère «Disponibilité en eau potable» en 1994.	160
5.16	Pourcentage de provinces vulnérables aux critères : «Condition environnementale et capacité de réponse», «Disponibilité des ressources en eau » et «Couverture des besoins en eau potable» en 2004.	161

5.17	Carte de vulnérabilité des provinces au critère «Condition environnementale et capacité de réponse» en 2004.	161
5.18	Carte de vulnérabilité des provinces au critère «Disponibilité des ressources en eau» en 2004.	162
5.19	Carte de vulnérabilité des provinces au critère «Disponibilité en eau potable» en 2004.	162

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ACP	Analyse en Composantes Principales
AGRHYMET	Centre Régional de Formation et d'Application en AGRo HYDrologie Opérationnelle et MÉTéorologie
AP3A	Alerte Précoce
CART	Classification And Regression Tree
CDD	Consecutive dry days (Maximum de jours consécutifs secs)
CILSS	Comité permanent Inter-états de Lutte contre la Sécheresse au Sahel
CLIVAR	Climate Variability and predictability
DÉBIT_FG	Débit des forages
DÉFICIT_ÉC	Déficit d'écoulement des eaux
DGIRH	Direction Générale de l'Inventaire des Ressources Hydrauliques, Ouagadougou Burkina Faso
EAU_HECT	Quantité d'eau par hectare
ECHAM4	Modèle développé par le German Climate Research Centre
ETCCDMI	Expert Team Climate Detection Monitoring and Indices
FAO	Food and Agriculture Organisation of the United Nations
FIT	Front Intertropical
GIEC	Groupe d'expert Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
GIRE	Gestion Intégrée des Ressources en eau
INDI_PAUVTÉ	Pourcentage de population vivant en dessous du seuil de pauvreté

INSD	Institut National de la Statistique et de la Démographie
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
Max3days	Maximum de précipitation cumulée sur trois jours
MCG	Modèle Climatique Global
MOY	Précipitation moyenne mensuelle ou saisonnière
NBRE_FRG	Nombre de forages pour 300 habitants
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIV_STATIQUE	Niveau statique des eaux souterraines
NOAA	National Oceanographic and Atmospheric Agency
OMM	Organisation Météorologique Mondiale
ONEA	Office National d'Eau et d'Assainissement
ONG	Organisation non Gouvernementale
PAGIR	Plan d'Action de Gestion Intégrée des Ressources en eau
PERS_CHARG	Personnes en charge
Prcp90	90e percentile de précipitation quotidienne
Prepl	Nombre de jour avec précipitation (seuil ≥ 1 mm)
PrecTOT	Précipitation totale (mensuelle ou saisonnière)
PRES_AGR	Taux d'occupation des cultures par hectare
PRES_ÉLV	Taux d'occupation par unité de bétail à l'hectare
PRESAO	Prévision saisonnière des pluies et des écoulements en Afrique de l'Ouest
PROD_CPT	Production par habitant
Pwj>90p	Nombre de précipitation supérieure au 90e percentile par rapport à la période de référence 1961-1990
QTÉ_HBT	Quantité d'eau par habitant

RECHARGE	Recharge des forages
RENDT	Rendement des cultures céréalières
REV_AGR	Revenu sur les cultures vivrières
REV_ÉL	Revenu perçu de la vente des produits d'élevage
REV_RENT	Revenu sur les cultures de rente
SDII	Intensité moyenne de précipitation par jour humide (seuil ≥ 1 mm)
STARDEX	STATistical and Regional dynamical Downscaling of EXtremes for European regions
STD	Écart-type (mensuel ou saisonnière) mm
SUP_PL	Superficie des cultures pluviales
T_ACCRS	Accroissement démographique
ALPH	Taux d'alphabétisation des adultes et scolarité de moins de 15 ans
T_SCOLA	Taux de scolarité
TCB_EAU	Taux de couverture des besoins en eau
TCBC	Taux de couverture des besoins céréaliers
TCS	Taux de Couverture en Soins de santé primaire
UNEP	United Nations Development Human Programme
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
WCRP	World Climate Research Programme
ZCIT	Zone de Convergence InterTropicale

RÉSUMÉ

Depuis la fin des années 1960, l'Afrique Sahélienne subit une baisse générale de sa pluviométrie moyenne annuelle de l'ordre de 20 % au cours des années 1970 à 1989 par rapport à la normale 1961-1990. L'insuffisance des pluies et leur mauvaise répartition dans le temps ont de sérieuses conséquences tant au niveau du régime d'écoulement des cours d'eau, qu'au niveau des ressources économiques et environnementales. Le Burkina Faso, situé au cœur de la région sahélienne d'Afrique de l'ouest tire l'essentiel de ses ressources de l'agriculture pluviale et de l'élevage, avec une contribution de 30% au PIB. Dans cette région caractérisée par la faiblesse des ressources économiques disponibles et par des économies locales peu diversifiées, la capacité d'adaptation aux changements climatiques soulève des préoccupations importantes et conditionne l'efficacité des stratégies développées. L'objectif principal de cette étude est de développer des critères de vulnérabilité, afin de favoriser une meilleure capacité d'adaptation des populations sahéliennes face à la variabilité du climat. Ce qui vise à mieux comprendre les impacts de la variabilité du régime des précipitations sur les ressources en eau au Nord-Ouest du Burkina Faso, dans la région de la vallée de la Sirba, en prenant en compte les facteurs d'origine socio-économique. La méthodologie repose sur la conceptualisation de la vulnérabilité en groupant ses causes déterminantes dans de larges catégories. Deux étapes ont été suivies dans la réalisation de cette étude. La première consistait à la collecte d'informations d'origines diverses afin de mettre en évidence les aspects environnementaux, socio-économiques et institutionnels susceptibles de caractériser l'état de vulnérabilité ou de résilience de la population face à la variabilité du climat. La seconde était axée sur le regroupement des facteurs identifiés comme essentiels pour la vulnérabilité, leur croisement à l'aide de techniques d'analyse statistique de données multivariées pour la définition des critères. La vulnérabilité des populations a été mise en évidence par province à l'échelle du bassin, en utilisant un système d'information géographique et en combinant l'ensemble des informations. Les résultats de l'analyse en composantes principales sur les indices montrent trois critères dominants : les «Conditions environnementales et capacité de réponse» incluant les ressources en eau, pour la première et la dernière année (en 1984 et 2004), et «les Conditions environnementales et structurelles et la pression anthropique et capacité de réponse» pour l'année 1994. Le point commun entre les deux premiers critères des trois années est l'environnement, les besoins sanitaires de base des populations et le bien être humain en général se retrouvent parmi les premiers critères pour chaque année. La majorité des provinces sont vulnérables au critère «Condition environnementale et capacité de réponse», passant de 27,2 % en 1984 à 54,6 % en 2004. Cette recherche exploratoire a permis de développer une meilleure capacité d'intégration des données pour l'évaluation de la vulnérabilité des populations face au changement du climat dans un contexte local. Malgré les difficultés dues au manque de couverture spatiale et de l'hétérogénéité temporelle des données utilisées, elle a permis de mettre en évidence la variabilité du régime des précipitations et la faiblesse des capacités d'adaptation des populations. Par conséquent, la réduction de l'endettement et de la pauvreté des populations par la diversification des sources de revenu limiterait les risques liés à la variabilité du régime de distribution des précipitations par rapport à l'agriculture pluviale.

Mots clés : Bassin de la Sirba, Burkina Faso critères de vulnérabilité, variabilité et changement climatique, capacité d'adaptation.

INTRODUCTION

Les recherches scientifiques concernant les effets de la variabilité et des changements climatiques sur les activités humaines et la qualité de l'environnement se sont intensifiées au cours des deux dernières décennies bien qu'il existe encore de grandes incertitudes au sujet de ces changements (Vincent, 2004). L'activité anthropique croissante a déjà eu des conséquences non négligeables sur la quantité et la qualité des ressources en eau, ainsi que le réchauffement observé du climat (GIEC, 2001 et 2007), et par voie de conséquence sur les populations. Même si les changements de température seront amplifiés dans les régions arctiques et subarctiques, en raison notamment de la diminution de la couverture de neige et de glace marine tel que suggéré par les simulations issues des modèles globaux du climat (MCGs) (GIEC, 2007), les régions subtropicales et tropicales devraient connaître des effets plus sensibles sur les activités humaines que les autres régions du Globe. En effet, les facteurs socio-économiques et humains aggravant, notamment la pauvreté, une agriculture majoritairement non irriguée, et une capacité d'adaptation limitée pourraient exacerber l'effet des changements climatiques en Afrique tropicale. La FAO (Food and Agricultural Organization) estime que près de 65 % des terres arables sont situées dans les zones arides ou semi-arides, dont la majeure partie se retrouve en zone tropicale et subtropicale, alors que la malnutrition et l'insécurité alimentaire sont déjà présentes dans le contexte climatique actuel dans la majeure partie des pays d'Afrique de l'Ouest (FAO, 2000). Cette problématique des changements globaux est donc devenue un enjeu majeur notamment dans les régions soudano-sahéliennes avec à terme de fortes implications environnementales, sociétales et économiques (Hountondji *et al.*, 2004).

Le continent Africain est une des régions du monde parmi les plus vulnérables au changement du climat, en raison notamment d'une plus faible capacité d'adaptation des populations en lien avec une pauvreté plus généralisée que sur les autres continents (Huq *et al.*, 2003). En effet, bon nombre de pays africains se retrouvent à la queue du peloton pour ce

qui a trait à l'Indice de Développement Humain (UNEP, 2002). La vulnérabilité des pays sahéliens face aux fluctuations du climat est d'autant plus élevée que ces pays dépendent fortement de l'agriculture pluviale et possèdent des ressources et des économies locales limitées et peu diversifiées. Le secteur primaire représente 70 % de la valeur totale des exportations et 30 % du Produit Intérieur Brut en moyenne (INSD, 1996a). La variabilité et les impacts à long terme du changement climatique influencent les perspectives globales de développement des pays en voie de développement, en particulier les pays africains qui sont les plus pauvres donc moins susceptibles de se protéger et de s'adapter aux effets hydrologiques de la variabilité du climat (Vincent, 2004; Sokona et Denton, 2001). Ces pays, particulièrement ceux de la région sahélienne, manquent de capacités institutionnelle, économique et financière nécessaires pour faire face aux impacts du changement climatique. Comme le suggère le troisième rapport du GIEC (GIEC, 2001), la diminution des précipitations anticipées par certains MGCs, si elle s'accompagne d'une forte variabilité interannuelle, pourrait nuire au bilan hydrologique du continent et perturber de façon majeure plusieurs activités économiques.

Le bassin de la Sirba, situé entre le Burkina Faso et la partie sud du Niger, est parmi les régions les plus touchées par les fluctuations dans le régime des pluies, alors que cette zone est naturellement caractérisée par la rareté et la distribution sporadique des pluies dans l'espace, et par une évaporation très élevée. Dans ces régions prédisposées à des sécheresses récurrentes, à une érosion continue due aux vents, aux précipitations intenses lorsqu'elles surviennent durant la saison de mousson, et à une surexploitation des systèmes écologiques naturellement fragiles, des changements irréversibles et une détérioration des potentiels de production agricole sont à craindre (Stoorvogel et Smaling, 1990; Gachon *et al.*, 2007; Janicot *et al.*, 1996). La récurrence de la sécheresse qu'a connue la région au cours des dernières décennies a engendré des limitations sévères au développement socio-économique des zones rurales, où l'économie dépend de l'agriculture pluviale. En 1996, la pauvreté touchait la majorité des ménages ruraux (50,4 %) et une proportion grandissante de ménages urbains (16 %), dont 46 % sont analphabètes (INSD, 1996b). La forte densité de la population, le taux de croissance démographique très élevé, les migrations internes et

l'urbanisation favorisent une dégradation accélérée des milieux naturels fragilisés par des sécheresses endémiques.

Face aux modifications globales du climat à venir, l'UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) a proposé de mettre l'accent sur deux stratégies fondamentales de réponse aux changements climatiques: l'atténuation (ou «mitigation» en anglais) et l'adaptation (UNFCCC, 2006; Niasse *et al.*, 2004). Tandis que l'atténuation cherche à limiter le changement climatique en réduisant les émissions de gaz à effet de serre (GES), l'adaptation vise à alléger les impacts défavorables par une large gamme d'actions sur les systèmes spécifiques (Füssel et Klein, 2002). C'est dans cette optique que plusieurs états sahéliens se sont regroupés pour fonder en 1973 le Comité Inter-État de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel (CILSS). Les moyens développés par le CILSS pour réduire la vulnérabilité des populations face aux impacts des changements climatiques ont consisté entre autres à mettre en place: (i) le Système d'Alerte Précoce ; (ii) le Centre de recherche et de formation AGRHYMET (AGRIculture HYdrologie et MÉTéorologie) basé à Niamey (Niger); et (iii) le PRESAO (PRÉvision Saisonnière des pluies et des écoulements en Afrique de l'Ouest). La présente recherche vise en particulier à améliorer ou à appuyer l'adaptation face aux changements climatiques pour les pays membres du CILSS, et a pu bénéficier de la collaboration entre le Centre Régional AGRHYMET, Environnement Canada et l'Université du Québec à Montréal, via une contribution de l'Agence Canadienne de Développement International (ACDI).

L'objectif principal de cette recherche est de développer des critères de vulnérabilité, afin de favoriser une meilleure capacité d'adaptation des populations sahéliennes face à la variabilité et au changement du climat. Ce projet doit en particulier permettre de mieux comprendre les impacts de la variabilité du régime des précipitations sur les ressources en eau au nord-est du Burkina Faso, dans la région de la vallée de la Sirba. Il doit également prendre en compte les facteurs d'origine socio-économique propres à cette région. Les objectifs spécifiques de ce projet consistent à :

- Établir le portrait climatique, hydrologique et socio-économique de la période récente (1961-2004) et l'évolution des systèmes environnementaux au cours de cette période ;

- Procéder à l'analyse critique de l'évolution des données physiques et socio-économiques en vue de l'élaboration d'indicateurs représentatifs de la vulnérabilité des populations ;
- Développer et évaluer les critères de vulnérabilité pour faciliter le développement des stratégies d'adaptation plus efficaces et applicables dans le contexte socio-économique propre à cette région sahélienne.

Le traitement et l'analyse des images satellitales et des statistiques agricoles et sociodémographiques socio-économiques ont été réalisés afin d'identifier les caractéristiques qui influencent la capacité des systèmes naturel et humain à s'adapter aux aléas du climat, comme suggéré dans d'autres études en région sahélienne [Smit et Pilifosova, 2001; Burton *et al.*, 2004; Lepage *et al.*, 2007]. Des indicateurs de vulnérabilité ont été établis à partir de données environnementales quantitatives et des informations de nature semi-quantitative sur les populations et les activités humaines. Les données collectées regroupaient des indices pluviométriques et hydrologiques, des données satellitales (principalement l'indice normalisé de végétation et des cartes d'occupation du sol) ainsi que des données socio-économiques (statistiques agricoles et d'élevage). La répartition des zones vulnérables fut par la suite réalisée à l'échelle du bassin, en utilisant un système d'information géographique, et en combinant l'ensemble des informations sur le territoire de la Sirba.

Le premier chapitre dresse un portrait de l'état des connaissances dans le domaine, soit la définition de la vulnérabilité et son analyse réalisée dans différentes régions du monde, à partir d'informations environnementales et socio-économiques, dans un contexte continental, régional voire sahélien. Les facteurs connus de la vulnérabilité des populations au sein de la vallée de la Sirba ou d'une région similaire en zone sahélienne sont également présentés. Le chapitre II aborde la méthodologie, le cadre géographique de la zone d'étude, les données utilisées et les informations pertinentes, ainsi que les approches préconisées pour l'analyse et l'évaluation des résultats. Les chapitres III et IV présentent les résultats de la caractérisation climatique, environnementale et socio-économique de la zone d'étude et le chapitre V montre les résultats du croisement des données pour le développement des critères de vulnérabilité, les discute et suggère des applications et des travaux futurs à entreprendre dans d'autres régions du Sahel où des problématiques similaires existent. Des propositions

d'actions appropriées en faveur des zones les plus touchées par les changements potentiels à venir sont également suggérées.

CHAPTIRE I

ÉTAT DES CONNAISSANCES

Une définition de la vulnérabilité est tout d'abord présentée ainsi que les concepts suggérés pour étudier cette vulnérabilité dans le contexte des changements climatiques. Ensuite, seront abordés les approches et les outils utilisés dans les analyses de vulnérabilité, en particulier des populations, permettant de mettre en évidence les facteurs environnementaux (climat et géographie de la région) et les facteurs humains liés aux conditions socio-économiques qui peuvent perturber les systèmes naturels.

1.1 Définition générale et concept de vulnérabilité

La vulnérabilité d'un système naturel ou humain est le fait d'être sensible aux blessures, aux attaques ou d'éprouver des difficultés pour recouvrer un équilibre mis en péril après un désastre naturel (Moss, 1996). Il n'y a pas de consensus universellement admis sur la définition de la vulnérabilité. La notion de vulnérabilité est aujourd'hui couramment utilisée pour désigner un état de fragilité, une propension à subir des dommages ou une faible capacité à faire face à des événements désastreux. Elle désigne aussi bien des situations individuelles que collectives, tant des fragilités matérielles que morales, des personnes que des choses ou encore des territoires. Le terme vulnérabilité qui a son origine dans la littérature des risques naturels, de la pauvreté, de l'insécurité alimentaire et du développement, est largement appliqué aux études d'impacts face aux changements climatiques (Downing, 2003; FAO, 2000). Dans ce contexte, le terme de vulnérabilité revêt de nombreux sens.

Dans le domaine des risques naturels, la vulnérabilité est définie comme étant «le degré auquel une unité à risque est susceptible de subir des dommages via l'exposition à une perturbation ou à une contrainte, et la capacité (ou l'impossibilité) de l'unité à risque de faire face, de s'en sortir ou de s'adapter de manière fondamentale (en devenant un nouveau

système) ou de disparaître (Kasperson *et al.*, 2002). La littérature sur les catastrophes utilise le terme dans le sens de «degré de perte» (0 à 100) résultant d'un phénomène potentiellement néfaste. En revanche, la littérature sur la pauvreté et le développement (Bohle *et al.*, 1994) met l'accent sur les conditions socio-économiques et définit la vulnérabilité comme une mesure globale du bien-être humain qui intègre l'exposition à un éventail de phénomènes néfastes d'ordre environnemental, social, économique et politique.

Le GIEC donne dans son troisième et quatrième rapport (cf. GIEC, 2001 et 2007) une définition de la vulnérabilité en relation avec les changements climatiques : la vulnérabilité représente le degré par lequel un système risque de subir ou d'être affecté négativement par les effets des changements climatiques, y compris la variabilité climatique et les phénomènes extrêmes. Elle dépend du caractère, de l'ampleur, et du rythme des changements climatiques auxquels un système est exposé, ainsi que de sa sensibilité, et de sa capacité d'adaptation. Par conséquent, un système fortement vulnérable est un système qui est extrêmement sensible aux moindres changements du climat pour lesquels la capacité de s'adapter est sévèrement limitée.

Cette dernière définition combine donc trois éléments : l'exposition, la sensibilité, et la capacité adaptative. L'exposition est le contact entre un système et un aléa, tandis que la sensibilité est le point auquel un système, ou ses composantes, est susceptible d'éprouver un ou des dommages en raison de l'exposition (Kasperson *et al.*, 2002). Quant à la capacité d'adaptation, elle rassemble toutes les forces et ressources dont dispose une communauté, une société ou une organisation pour réduire le niveau de risque ou les effets d'une catastrophe. La capacité adaptative d'un système permet de modifier ou de changer ses caractéristiques ou son comportement afin de mieux faire face aux aléas externes existants ou prévus (Adger, 1999; Smit et Pilifosova, 2001; Adger *et al.*, 2004). D'autres auteurs (Wisner *et al.*, 1994; Vincent, 2004) définissent la vulnérabilité comme l'ensemble des caractéristiques d'une personne ou d'un groupe en termes de leur capacité de prévoir, faire face, résister et récupérer des impacts des risques naturels. Ils ajoutent que la vulnérabilité peut être perçue comme un processus continu de la résilience à la sensibilité. La capacité d'adaptation inclut les moyens physiques, institutionnels, sociaux ou économiques ainsi que

1.2 Approches utilisées en évaluation de la vulnérabilité

Bien que plusieurs disciplines conviennent d'accepter une définition commune de la vulnérabilité comme "susceptible de nuisance", l'utilisation du terme change en fonction des disciplines et des secteurs de recherche. Les sociologues considèrent la vulnérabilité d'une population comme représentant l'ensemble des facteurs socio-économiques qui déterminent la capacité à faire face à un désastre (Allen, 2003; Cutter *et al.*, 2000), tandis que les sciences du climat perçoivent la vulnérabilité en termes de probabilité d'occurrence d'événements et d'impacts reliés au climat (Nicholls *et al.*, 1999). La première approche synthétique vise donc à cerner les conditions ou les facteurs influant sur la capacité de réponse à une situation de crise, et la deuxième approche consiste à mesurer les dommages potentiels des éléments exposés.

1.2.1 Approches utilisées en sciences du climat

Les sciences du climat ont longtemps étudié les risques en se focalisant sur l'aléa, sur le phénomène potentiellement destructeur, sur les processus en jeu et leurs manifestations physiques. Elles utilisent le plus souvent les données historiques et les projections des MCGs. Elles sont souvent employées dans les études de vulnérabilité aux risques naturels face au changement climatique (Clark *et al.*, 1998; Hewitt, 1983; GIEC, 1995) et examinent l'exposition humaine aux risques. Elles consistent en une mesure analytique quantitative, c'est-à-dire en une évaluation des dommages potentiels aux biens, aux personnes et à l'environnement économique. Cette approche a été utilisée dans plusieurs régions du monde afin de prévoir les impacts potentiels du changement climatique via les projections quantitatives établies dans le futur (Barrow *et al.*, 2004). Par exemple les simulations issues des MCGs sous hypothèse du doublement de la concentration du CO₂ atmosphérique s'accordent sur des anomalies très marquées des variables atmosphériques près de la surface terrestre, par rapport au climat actuel, et ce pour la plupart des pays du Globe.

Les premières évaluations du GIEC (1995) ont examiné les menaces que représentent les changements climatiques au niveau global. Puis, peu à peu, d'autres auteurs ont explicitement étudié les impacts du changement du climat sur la vie des communautés, tels que l'incidence du changement climatique sur la prolifération de la malaria (Martens *et al.*,

1999 ; van Liesert *et al.*, 2004), la sécurité alimentaire (Parry *et al.*, 2004), la disponibilité de l'eau (Arnell, 2004) et les inondations côtières (Nicholls *et al.*, 1999). Des critiques ont été formulées à l'encontre de ces études en disant que les humains sont les destinataires passifs du changement environnemental global, et de ce fait, elles ne prennent pas en compte leur capacité dynamique de s'adapter à de tels risques, en résistant à un événement ou à y faire face lorsqu'il se produit (Jones et Boer, 2003). L'analyse de la vulnérabilité basée sur le bien être social et le changement environnemental associé aux changements climatiques est d'autant plus importante que ces changements ont des impacts significatifs sur le bien être relatif ou absolu des individus ou des groupes d'individus (Adger et Kelly, 1999; Hewitt, 1983). En d'autres termes sans population, il n'y a pas d'aléas (O'Keefe *et al.*, 1976).

L'approche prédictive donne une indication des conséquences et identifie les biens qui sont affectés par les changements climatiques. À cet effet, elle est souvent utilisée pour la gestion des risques. L'une des principales limitations de cette approche basée uniquement sur les informations de nature climatique, est qu'elle ignore les besoins distincts et les attributs locaux et/ou à caractère communautaire de la vulnérabilité. Par ailleurs, les informations sur les changements globaux ont peu de valeur pour les décideurs qui ont besoin d'informations pouvant s'appliquer au niveau régional et local. Dans ces conditions, la compréhension des implications socio-économiques du changement climatique nécessite l'intégration des informations du risque climatique avec celles concernant les systèmes environnementaux, socio-économiques qui sont exposés à ces risques.

1.2.2 Approches utilisées en sciences sociales

L'analyse des interactions et des relations entre la société et son environnement, appelée approche écosystémique, conduit à mettre en évidence les principaux facteurs socio-économiques, institutionnels, et, à un moindre degré, politiques et culturels qui déterminent comment les populations répondent et font face aux risques posés par le climat en évolution (Burton, *et al.*, 1993; Adger et Kelly, 1999; Downing *et al.*, 2001; Gonzalez, 2002; Vincent, 2004). Au lieu de se concentrer seulement sur le risque d'exposition aux phénomènes physiques, cette approche reconnaît que de tels phénomènes sont exacerbés ou atténués par le contexte humain particulier (social, politique, économique, et institutionnel) dans lequel ils se produisent. L'ampleur des impacts du changement de climat est intimement liée aux

conditions humaines qui créent une résilience ou une vulnérabilité à cet événement. Contrairement aux changements climatiques qui sont appréhendés en premier lieu à l'aide de simulations des MGCs et dont la précision décroît à mesure que le cadre géographique est plus restreint, les aspects sociaux de la vulnérabilité sont perçus au niveau régional et local. Par exemple, le déficit hydrique dont a souffert la population sahélienne durant les dernières décennies, a aussi une conséquence sociale qui favorise le déséquilibre entre la demande et la disponibilité de l'eau (Taith, 2007).

Plusieurs méthodes sont utilisées pour appréhender les aspects sociaux de la vulnérabilité des populations face aux changements climatiques telle que la recherche déductive ou qualitative. L'approche de la *grounded theory* par exemple est basée sur la recherche qualitative. Selon Lepage *et al.* (2007), « l'approche qualitative permet de comprendre l'univers de référence des enquêtés, soit la manière dont ils interprètent le monde qui les entoure, les relations qu'ils entretiennent avec leur groupe et leur environnement et comment leur perception du monde guide leur compréhension ». Cette approche a été utilisée par Lepage *et al.*, (2007) au Sahel afin de collecter à l'aide d'enquêtes sur le terrain la perception des populations sur la variabilité du climat, en particulier dans le bassin de la Sirba. Elle se base sur la connaissance des populations vis-à-vis des ressources en eau et de son utilisation, à savoir (i) leur perception face aux transformations dues à la variabilité climatique, et leurs incidences sur les activités socio-économiques, (ii) les liens entre la variabilité climatique et la gestion de l'eau, et (iii) les principaux acteurs intervenant en cas de problèmes, le cadre institutionnel et sa pertinence en matière de gestion durable.

Certains travaux (Moss, 1996; Gonzalez, 2001; Downing, 2003; Adger *et al.*, 2004 ; Burton et Lim, 2005) ont cependant conceptualisé cette notion de vulnérabilité, en la qualifiant et en la quantifiant par des indicateurs et des indices pondérés pour en faciliter l'utilisation par les décideurs. La plupart de ces recherches sont fondées sur le choix d'une multitude d'indicateurs basés sur la compréhension théorique de la vulnérabilité. Celle-ci est le résultat de l'exposition d'une communauté à un risque ayant une faible capacité à y faire face. Ainsi, pour évaluer les niveaux relatifs de la vulnérabilité sociale aux variations de la disponibilité de l'eau induite par le changement du climat, et faire la comparaison à l'échelle de l'Afrique, Vincent (2004) a élaboré un indice global basé sur les concepts théoriques de la vulnérabilité sociale.

L'indice est formé par la moyenne pondérée de cinq sous-indices composés du bien-être et de la stabilité économique, de la structure démographique, de la stabilité et de la force institutionnelle, de l'infrastructure publique et enfin de la dépendance à l'égard des ressources naturelles. Le Niger, la Sierra Leone, le Burundi, Madagascar, et le Burkina Faso se sont avérés être les pays les plus vulnérables en Afrique d'après la classification de Vincent (2004). L'intérêt de cette approche est qu'en plus de l'indice de vulnérabilité sociale, les indicateurs appropriés de la vulnérabilité biophysique sont également associés, permettant une évaluation holistique intégrée des impacts du changement climatique sur la disponibilité de l'eau. Elle contribue à surmonter la divergence persistante dans différentes approches épistémologiques de la recherche sur la vulnérabilité aux changements climatiques. Elle met en relief des secteurs prioritaires pour l'aide ciblée, en établissant la capacité adaptative des sociétés et des populations.

Peu d'études établissent cependant d'établir comment les catégories d'indicateurs sont liées théoriquement et conceptuellement à l'identification et à la compréhension de la vulnérabilité. À cet effet, Adger *et al.*, (2004) ont montré qu'il est possible de comparer la vulnérabilité des personnes et des lieux dans le temps et dans l'espace en constituant une base de données quantitatives sur les indicateurs socio-économiques de la vulnérabilité face au changement climatique. Ce travail a été réalisé en combinant les approches des sciences du climat et des risques naturels, et en développant un cadre conceptuel du risque, de la vulnérabilité et de la capacité adaptative. Cette approche a été employée dans la zone côtière de Sydney Council Group en Australie (Preston *et al.*, 2008) afin de cartographier le risque potentiel lié à cinq impacts majeurs du changement climatique: (1) fortes chaleurs et ses effets sur la santé; (2) l'augmentation du niveau de la mer et l'aménagement côtier ; (3) les précipitations extrêmes et la gestion des eaux de ruissellement en zones urbaines; (4) les feux de brousse et les écosystèmes naturels.

De multiples indicateurs utilisant la combinaison de facteurs issus d'une projection du changement climatique, de la topographie, de l'utilisation du sol, et de la démographie ont été intégrés pour cartographier trois composantes de la vulnérabilité : l'exposition, la sensibilité et la capacité adaptative. Tandis que cette approche intègre un grand nombre de facteurs qui contribuent au risque, elle ne fait pas toutefois des projections quant aux conséquences. Elle est

cependant flexible quant à la prise en compte de données diverses et l'incorporation de diverses sources d'informations.

1.3 Facteurs environnementaux de la vulnérabilité

L'environnement désigne un ensemble d'éléments physiques, chimiques et biologiques et des facteurs sociaux susceptibles d'avoir un effet direct ou indirect, immédiat ou à long terme sur les être vivants et les activités humaines (Jolivet et Paré, 1993). Depuis les années 1970 le terme environnement est utilisé pour désigner le contexte écologique global, c'est-à-dire l'ensemble des conditions physiques, chimiques, biologiques climatiques, géographiques et culturelles au sein desquelles se développent les organismes vivants, et les êtres humains en particulier. L'environnement inclut donc l'air, la terre, l'eau, les ressources naturelles, la flore, la faune, les hommes et leurs interactions sociales.

Les facteurs naturels de la vulnérabilité des populations sahéniennes concernent : le déboisement et la dégradation des terres, les ouragans, les inondations, les précipitations extrêmes, la sécheresse et la pénurie d'eau, et les pertes de la biodiversité. La vulnérabilité évoque dans ce contexte le risque, pour les systèmes naturels et humains, et les conséquences préjudiciables liées aux changements environnementaux comme par exemple les changements futurs dans les événements extrêmes et l'augmentation du niveau des mers. Les impacts des événements extrêmes sont les principaux phénomènes climatiques qui rehaussent la vulnérabilité (Downing, 1991). Dans le contexte sahélien, le climat et les conditions socio-économiques constituent les principaux facteurs de vulnérabilité des populations. Par conséquent, l'intérêt de développer les critères est de réduire la dimensionnalité du concept de vulnérabilité, pour une interprétation plus aisée.

1.3.1 Facteurs climatiques

La grande majorité des espèces vivant à la surface de la Terre et incluant l'être humain, sont sensibles au climat à des degrés divers. Le milieu de vie tel qu'il est conçu pour la majeure partie des populations du Globe, et le système de production des biens de consommation sont fortement influencés par le climat ambiant (Klein *et al.*, 2007). Puisque le climat est intrinsèquement variable à toutes les échelles de temps (i.e. saison, année) influence reconnu par le GIEC en 2007, les sociétés humaines ont toujours dû développer des

stratégies pour faire face aux variations du climat ou survivre à des événements extrêmes. Compte tenu de la nature complexe de la vulnérabilité des populations face aux fluctuations du climat, il y a lieu de faire la distinction entre la variabilité naturelle du climat, le changement climatique d'origine anthropique à venir (2050-2100) et les risques associés.

Le changement climatique, selon la définition du GIEC (2001), indique les variations statistiquement significatives de l'état moyen du climat ou de sa variabilité, persistant sur une période prolongée de l'ordre de quelques décennies ou plus. Les changements climatiques sont dus à des processus internes naturels ou à des forçages externes, ou encore à la persistance de variations anthropiques de la composition de l'atmosphère ou de l'utilisation des sols (GIEC, 2001). Le réchauffement actuel de la planète est dû à l'impact anthropique sur le système climatique, via l'augmentation des gaz à effet de serre. En dépit du fait que des effets discernables sur les fluctuations climatiques récentes sont attribuables à des activités humaines, principalement depuis le début du XXe siècle (cf. GIEC, 2007), les principaux effets liés aux activités humaines sont censés prendre de l'ampleur dans l'avenir (par ex. au cours du XXIe siècle). Par ailleurs, la Convention cadre des Nations Unies sur le changement climatique établit ainsi une distinction entre "le changement climatique" attribuable aux activités humaines, altérant notamment la composition de l'atmosphère, et la "variabilité climatique" attribuable aux causes d'origine naturelle. À cet effet, le GIEC (2007) considère le changement climatique comme étant lié directement ou indirectement aux activités humaines. C'est pourquoi, il est bien reconnu par la communauté scientifique et maintenant couramment utilisé, le terme "changement climatique" désigne principalement les projections climatiques futures dans lesquelles le forçage anthropique aura des impacts sur l'état climatique futur (GIEC, 2007).

Selon la définition communément acceptée, la variabilité est la disposition à se soumettre à des changements ou à présenter des changements plus ou moins fréquents. La variabilité climatique est définie, entre autre, comme la modification du climat ou d'un paramètre climatique dans l'espace (régions ou pays) ou dans le temps, par rapport à un état de référence (Duchiron et Beltrando, 2002). La variabilité climatique dans notre étude signifiera les fluctuations climatiques passées et observées au cours des récentes décennies, et marquées par des anomalies d'ordre exogène (télé-connections) issues de causes naturelles,

ou d'ordre endogène (actions anthropiques). Pour des raisons pratiques et afin de comparer la variabilité passée par rapport à un état de référence, on définit comme les anomalies du climat par rapport à un état de référence ou une normale climatique calculée sur une période de 30 ans (OMM 1984 ; Guttman, 1989), soit la normale de 1961 à 1990 dans notre cas.

Le terme risque fait référence à la probabilité qu'un événement d'une certaine étendue (ou ampleur), intensité et durée entraînant des conséquences négatives, puisse se produire. Ainsi, le risque climatique est défini en termes de valeur absolue au moyen des variables telles que les précipitations, la température, l'intensité, la vitesse de vent, ou les niveaux d'eau (mares, rivières, eaux souterraines). Récemment, la réponse de la population face au risque a été introduite en considérant que plus la réponse est bonne moins le risque est fort. C'est pour cette raison que dans certaines régions, la réponse est évaluée à travers un critère numérique dont la valeur est ensuite soustraite au produit de l'aléa par la vulnérabilité.

Risque = [Aléa x Vulnérabilité] – Capacité de réponse.

Des événements climatiques extrêmes (exemple sécheresse, inondation) sont de plus en plus fréquents dans les régions sahéliennes depuis la fin des années 1960 (Houghton *et al.*, 2001; Gachon *et al.*, 2007), et plusieurs d'entre eux ont causé d'importants dégâts en diverses régions du Sahel au cours des dernières années (Ozer *et al.*, 2003; Sene et Ozer, 2002). Le dernier rapport (GIEC, 2007) mentionne que ces phénomènes ont évolué de façon significative aux échelles globale, régionale et locale.

a) Variabilité historique observée à l'échelle globale et continentale

À l'échelle globale, le changement climatique est souvent analysé en se focalisant sur l'évolution des températures de surface et des précipitations, ainsi que la surface de la banquise. L'ensemble de la communauté scientifique (GIEC, 2007) s'accorde sur l'existence d'une modification du climat et sur un réchauffement global à venir, alors que l'évolution historique depuis plus d'un demi-siècle suggère une augmentation des températures à l'échelle globale. La valeur admise est de +0,6°C, avec une marge d'erreur de $\pm 0,2^\circ\text{C}$, par rapport aux valeurs observées, de 1856 à la fin du XXe siècle (GIEC, 2001). Cette hausse n'est cependant pas régulière, et quatre phases peuvent être distinguées :

- une phase stationnaire de 1856 à 1920 environ, avec entre ces dates des phases plus ou moins froides;
- une première hausse entre 1920 et 1940 environ, lors de laquelle les températures moyennes de surface augmentent de près de 0,5°C par rapport à la moyenne de la période précédente (1856-1920);
- une nouvelle phase de stagnation (baisse par rapport à la valeur 1920-1940) entre 1940 et 1980 ;
- une seconde phase de hausse à partir de la fin de la décennie 1970.

Depuis le troisième rapport du GIEC (2001) des progrès ont été réalisés dans la compréhension des fluctuations du climat dans le temps et dans l'espace. La température augmente presque partout excepté sur quelques secteurs très précis dans les océans de l'hémisphère sud, et en quelques points de l'hémisphère nord. La hausse est particulièrement marquée sur le centre de l'Amérique du Nord, le nord-est de l'Europe et l'est de l'Eurasie, mais moins importante dans la zone tropicale. Ceci signifie que l'augmentation moyenne observée au niveau planétaire est à nuancer dans l'espace, et qu'elle ne représente pas parfaitement l'évolution thermique de chaque région du Globe, puisqu'il existe des différences.

Dans le même temps, les tendances observées dans le régime de précipitations pour la période 1900 à 2005 ne sont pas univoques, comme dans le cas des changements observés de températures. À l'échelle continentale, des précipitations significativement accrues à l'échelle annuelle ont été enregistrées à l'est de l'Amérique du Nord et de l'Amérique du Sud, au nord de l'Europe, en Asie du nord et en Asie centrale. Dans la zone tropicale les variations des pluies sont plutôt disparates. Un assèchement a été observé dans le Sahel, en Méditerranée, au sud de l'Afrique et dans certaines parties du sud de l'Asie depuis la fin des années 1960 jusqu'aux années 1990.

b) Variabilité historique observée à l'échelle régionale

Depuis 1960, l'Afrique de l'Ouest a connu au moins une grande sécheresse tous les 10 ans (DMC, 2000; Nicholson, 1980). Au Sahel, les conditions humides qui prévalaient dans les années 1950 ont cédé la place à des conditions arides et semi-arides avec une baisse

continue des précipitations observée depuis le début des années 1970 (Nicholson, 1981; Hulme, 1996; Nicholson, 2000; Le Barbé *et al.*, 2002;). L'Hôte *et al.* (2002) ont mis en évidence un net déplacement vers le sud des isohyètes caractéristiques de la zone sahélienne (300 à 750 mm de pluie par an) entre les deux périodes 1951-1969 (humide) et 1970-1989 (sèche), avec une progression vers le sud des zones désertiques et semi désertiques jusqu'à la latitude de 14° 31'N (soit la latitude de Mopti au Mali). Ces variations s'inscrivent dans une tendance générale d'aridification progressive de la région sahélienne (Leroux, 2000), avec une accélération ces dernières années, en partie attribuée à des causes humaines notamment en lien avec des modifications du couvert végétal, suite aux déboisements dans la zone sahélienne, et à la déforestation des régions tropicales humides situées au sud du Sahel.

Ces changements ont entraîné des conséquences sur le développement durable de la région. L'une des sécheresses majeures (de 1970 et 1989), a engendré plus de 100 000 morts au Mali, au Niger et en Mauritanie, et plus de 750 000 personnes se sont retrouvées entièrement dépendantes de l'aide alimentaire pendant cette période (Wijkman et Timberlake, 1984). La sévérité de la sécheresse durant les années déficitaires, soit la longueur des phases sans pluie et la diminution des jours de précipitations (Gachon *et al.*, 2007), ont causé de nombreuses pertes dans les récoltes de céréales (600 000 tonnes par an). Cela signifie un manque à gagner d'environ 15% sur le revenu annuel moyen des populations (Leisinger et Schmitt, 1996).

c) Contexte local de la variabilité du climat

Au Burkina Faso, la pluviométrie moyenne annuelle a baissé de 179,4 mm entre les périodes 1949-1967 (612,1 mm) et 1968-1988 (432,7 mm) (Ministère de l'Agriculture et des Ressources Animales, 1992). D'après la même étude, la saison des pluies a également baissé de 53 jours à 44 jours entre ces deux périodes. Cette péjoration climatique des dernières décennies a eu des effets néfastes sur les ressources en eau dans l'ensemble du bassin de la Sirba. Au sein de ce bassin, on a assisté à une très forte modification des états de surface, notamment la dégradation du couvert végétal et des sols. Cette baisse des ressources en eau a forcément entraîné celle des productions et des rendements des cultures vivrières comme le mil, le sorgho, ou le maïs pour ne citer que ceux-ci, dont plus de 60% de la baisse des rendements de 1972 à 1984 serait imputable aux seules variations pluviométriques (Voisins,

1997). Les conséquences économiques ont été à chaque fois catastrophiques et un véritable processus d'appauvrissement s'est déclenché. L'agriculture et l'élevage s'effondrèrent après ces cinq années de sécheresse (Leisinger et Schmitt, 1996; DMC. 2000).

d) Changements anticipés au cours du 21^{ème} siècle à l'échelle globale

L'évolution du système climatique au cours du XXI^e siècle peut être abordée à travers les paléoclimats et les simulations, c'est-à-dire en utilisant des modèles climatiques. L'évolution future des émissions des gaz à effet de serre est prise en compte sous la forme de divers scénarios d'émissions, représentant chacun différentes hypothèses sur l'évolution démographique et économique probable de nos sociétés (GIEC, 2007). Dans le cadre de ces augmentations de la concentration atmosphérique de gaz à effet de serre, la température moyenne annuelle devrait augmenter dans une fourchette de 3°C à 5,4°C d'ici 2100 (GIEC, 2001), avec de fortes modulations temporelles et spatiales. En effet, l'élévation des températures sera plus importante dans les hautes latitudes de l'hémisphère nord, alors que certaines zones du Pacifique sud connaîtront des changements de température plus faible. Cependant, la réponse de l'ensemble du système climatique, et du cycle hydrologique en particulier, est plus difficile à déterminer que l'évolution des températures.

e) Changements anticipés à l'échelle régionale

Les changements anticipés pour l'horizon 2100 dans le régime de précipitations et de températures en Afrique de l'Ouest varient selon les MGCs. Le dernier rapport du GIEC (2007) indique que la hausse de la température moyenne entre 2080 et 2099 par rapport à la période 1980-1999 pourrait atteindre 3 et 6°C sur l'ensemble du continent africain (cf. figure 1.2), soit 1,5 fois plus qu'au niveau mondial. Cependant, l'incertitude reste élevée quant aux changements potentiels et plausibles du régime de mousson. Toutefois, les risques de déficits pluviométriques significatifs sont très probables. Le rapport précise que tout changement non seulement dans la valeur moyenne des précipitations, mais également dans la fréquence, la durée et l'intensité des événements de précipitations affecte et affectera directement l'ampleur et la distribution temporelle de l'écoulement de l'eau, et notamment le cycle des inondations/sécheresses, dans un contexte de diminution envisagée des quantités totales de précipitations au niveau annuel (cf. figure 1.3).

La question, cruciale pour le Sahel, est de savoir si le prochain quart de siècle perpétuera les séquences sèches et humides observées au cours du XX^{ème} siècle. Selon Garba (2001), trois hypothèses semblent plausibles : (i) une continuité dans l'évolution actuelle, qui implique une alternance de périodes sèches et de périodes humides; (ii) une rupture dans les tendances climatiques qui indique que le prochain quart de siècle sera en moyenne nettement plus sec que le précédent, au point de faire figure de catastrophe majeure dans les régions sahéennes; (iii) une rupture dans la variabilité récente créant les conditions favorables à un accroissement de la pluviométrie sur le Sahel. Sur la base d'une extrapolation des tendances récemment observées, cet auteur favorise l'hypothèse plus plausible d'un dessèchement lent, non significatif à l'échelle d'une génération humaine mais assortie de périodes sèches plus ou moins prononcées, sur une période de vingt cinq ans.

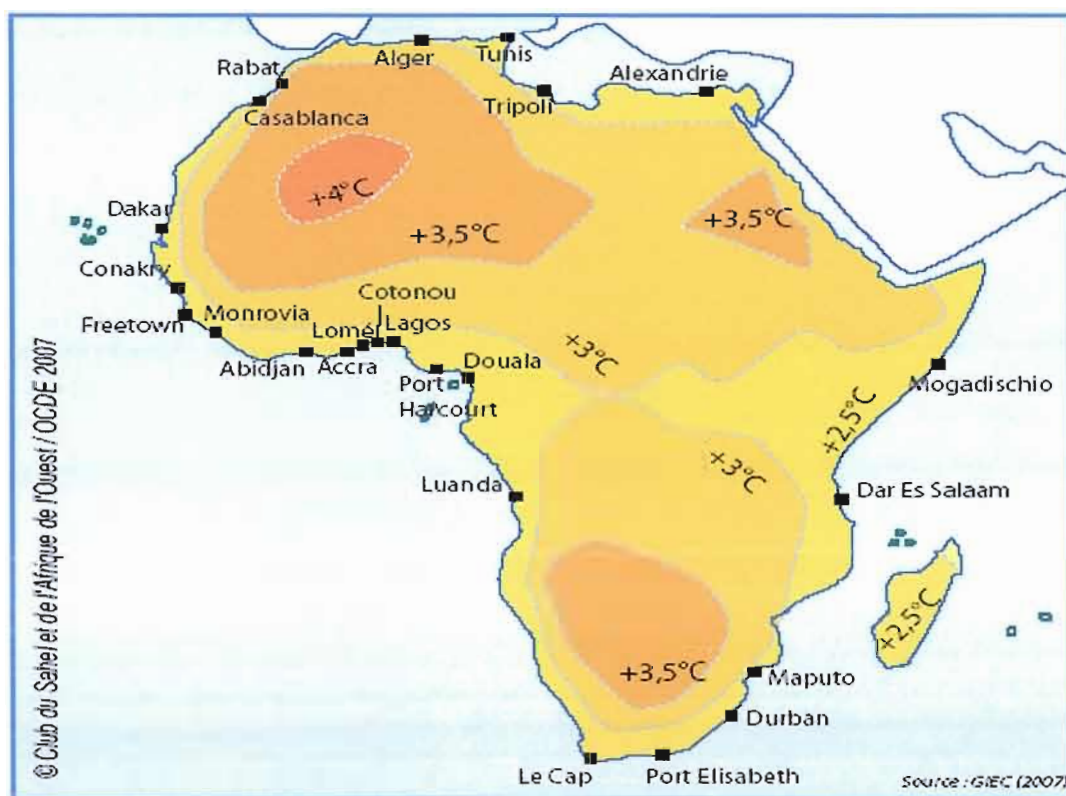


Figure 1.2 Augmentation des températures moyennes mesurées selon les projections du GIEC (2007) sur le continent africain par rapport à la normale climatique 1961-1990. (Source : GIEC, 2007)

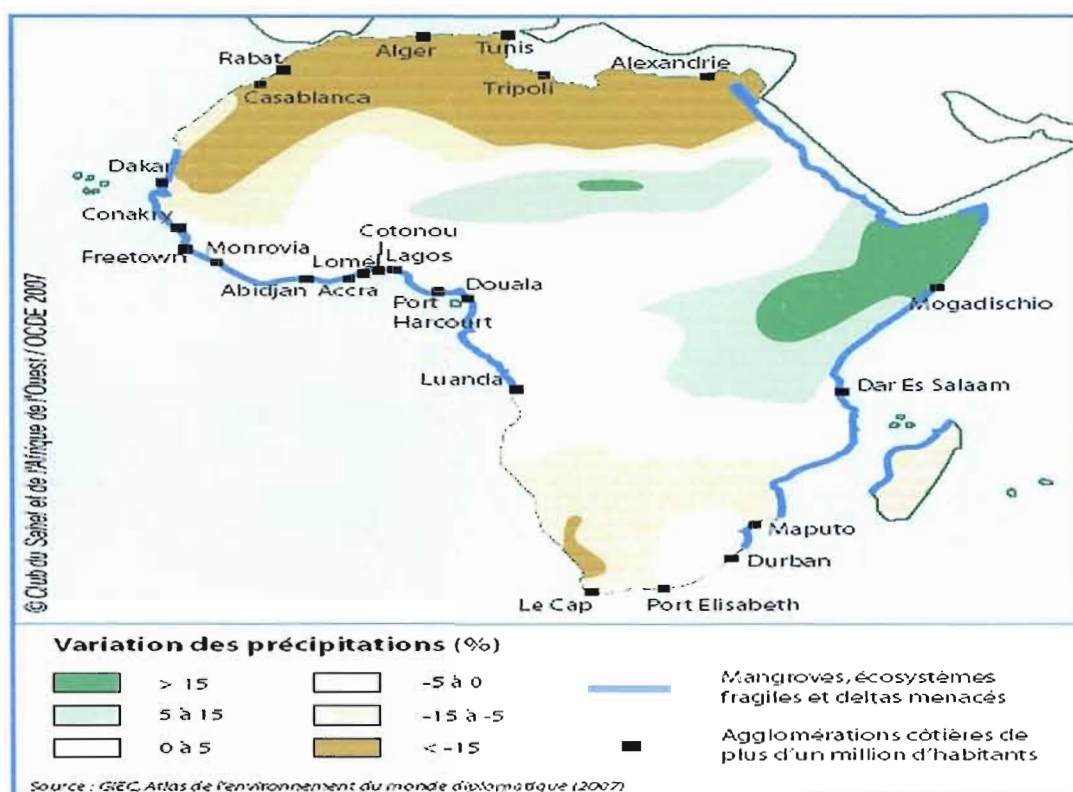


Figure 1.3 Changements du régime de précipitations moyennes annuelles par rapport à la normale climatique 1961-1990 en Afrique selon les projections du GIEC (2007). (Source : GIEC, 2007)

1.3.2 Facteurs humains

La vulnérabilité comme état chronique (c.-à-d. comme variable décrivant l'état interne d'un système avant l'occurrence d'un événement de risque) résulte des facteurs structureaux qui rendent les sociétés humaines et les communautés susceptibles de subir des dommages irréversibles dès lors que ces sociétés sont soumises à des risques externes majeurs (Allen, 2003). Parmi les facteurs qui agissent de manière à miner la capacité d'autoprotection et exposent quelques groupes d'individus ou des communautés à de plus grands ou plus fréquents risques que d'autres groupes, les facteurs humains et/ou socio-économiques suivants sont les plus souvent impliqués : la croissance démographique, la pauvreté, l'insécurité alimentaire, la difficulté d'accéder aux soins de santé, le niveau d'instruction, l'inégalité de genre, la fragilité et la non diversification de l'économie, le manque d'accès aux ressources, l'ignorance de technologies nouvelles et la désintégration des modèles sociaux. Certains auteurs (Hewitt, 1983; Vincent, 2004) mettent l'accent sur la

structure sociale et économique ainsi que le manque d'accès aux ressources comme causes de la vulnérabilité. Les menaces résultent d'une combinaison de processus sociaux et environnementaux liés au contexte économique et institutionnel. Ainsi, dans son étude sur le Vietnam, Adger (1999) considère la vulnérabilité sociale comme étant l'exposition des individus et des communautés aux stress de subsistance associés à l'économie de transition en cours dans ce pays.

D'autres facteurs comme le manque d'accès à l'information pertinente et de sensibilisation de la population, en second la faible représentation des pauvres à la vie politique et à la prise de décision aggrave la vulnérabilité des populations. Pour les pays en développement comme ceux de la région sahélienne, la vulnérabilité économique est liée à un certain nombre d'éléments additionnels ou cumulatifs soit la faiblesse des économies nationales, des revenus commerciaux, de l'aide, des investissements et les modèles de consommation.

1.4 Étude de cas

Plusieurs chercheurs (Adger et Kelly, 1999; Downing, 2003 et Downing *et al.*, 2005) se sont intéressés à l'évaluation de la vulnérabilité des populations aux changements climatiques dans plusieurs régions du globe, notamment la zone sahélienne d'Afrique de l'Ouest et particulièrement le Burkina Faso. Ainsi, dans leur étude sur la pauvreté et la vulnérabilité des populations au Burkina Faso, Niameogo *et al.* (1997) ont mentionné les facteurs socio-économiques comme étant l'une des principales causes de la vulnérabilité des populations face au changement climatique. Leur approche est basée sur l'évaluation qualitative et quantitative de la capacité/incapacité à satisfaire les besoins mesurables face à un aléa climatique. L'absence de moyens économiques (monnaie ou réserves de richesse) explique l'absence d'accessibilité des groupes vulnérables à tel ou tel service. Les facteurs sociaux se caractérisent par un taux de dépendance théorique élevé, lié à un taux de fécondité élevée, impliquant donc une lourde charge familiale. De plus l'absence de jeunes de 15 à 25 ans qui constituent les soutiens familiaux, une santé précaire, incluant la maladie, les handicaps et la vieillesse et une forte inégalité au sein même du ménage, où les femmes et les enfants n'ont pas les mêmes droits d'accès aux ressources que les hommes, tout ceci représente des facteurs de vulnérabilité majeurs (Dabire, 2003).

1.5 Outils d'évaluation de la vulnérabilité

L'évaluation de la vulnérabilité des populations demande l'utilisation de plusieurs techniques et outils, notamment le croisement et l'analyse de liens de causalité entre différentes localités à l'aide de méthodes statistiques, ainsi que la combinaison et la superposition des différentes sources d'informations via les Systèmes d'Information Géographique (SIG). La plupart des études d'analyse de la vulnérabilité utilisent les techniques statistiques telles que la régression, la corrélation, l'analyse en composantes principales, dans le but de réduire la dimensionnalité d'un grand nombre de variables en un regroupement de variables dépendantes, et les outils d'analyse multicritère. L'objectif de ces recherches est d'identifier les secteurs et les populations les plus vulnérables selon une combinaison de facteurs propres. Ces méthodes conduisent à l'élaboration d'indicateurs synthétiques, et à l'établissement d'un indice de risque par agrégation de tous les indicateurs considérés.

D'autres approches combinent l'algorithme CART¹ (Classification And Regression Tree; Breiman *et al.*, 1984), l'analyse en composantes principales et la procédure « Fuzzy Set » (Eastman et Jiang, 1996). L'algorithme CART a été utilisée pour mesurer et analyser les différents indicateurs de la sécurité alimentaire en Ethiopie (Seyoum, 1995), afin notamment d'évaluer le nombre moyen de personnes nécessitant l'aide alimentaire. Les données alors analysées comprennent l'indice normalisé de végétation (NDVI), les prix de bétail et de céréales vivrières, la production agricole, les rendements de la production céréalière, la diversité des récoltes, les données démographiques et le pourcentage de la population affectée.

Les SIG sont également utilisés dans les études d'évaluation de la vulnérabilité des populations face aux risques généraux et au risque particulier du changement climatique dans la région sahélienne (Hountonghi *et al.*, 2004). Ils sont utilisés pour l'acquisition et d'organisation et la structuration les données nécessaires aux analyses de risques, et d'évaluer la vulnérabilité des populations sur une région donnée. Les cartes de vulnérabilité structurelle

¹ La méthode CART par exemple produit un diagramme d'arbre en dédoublant successivement les données dans de plus petits groupes. C'est l'ensemble représentatif de niveaux indépendants de variables qui détermine la variabilité de la variable dépendante.

dans les pays sahéliens (AP3A, 2001) sont de nos jours des informations incontournables d'aide à la décision. Ces cartes ont été réalisées à partir des données collectées sur les systèmes de production des neufs pays du CILSS. Les zones structurellement vulnérables sont définies par rapport au taux de couverture des besoins agro-alimentaires (CILSS, 2000). L'information intégrée dans le SIG sert également à combiner les données afin de visualiser les zones à risques, facilitant ainsi l'analyse et la superposition des informations pour les décideurs politiques et les acteurs économiques.

En résumé, dans ce travail, le concept de vulnérabilité fait référence aux trois termes retenus par le GIEC (2001) : exposition, sensibilité et capacité adaptative. Cependant, la multiplicité des facteurs de risque a amené certains auteurs à introduire d'autres concepts ou méthodes plus englobants qui définissent plus finement la situation, comme la vulnérabilité à de multiples stress ou la vulnérabilité différentielle. En définitive, nous retenons de cette revue de littérature que les spécialistes du climat ou des catastrophes naturelles considéraient les populations vulnérables comme des acteurs passifs (victimes) face aux risques environnementaux et socio-économiques. Tandis que les concepts récents mettent l'accent sur les capacités des populations vulnérables à anticiper les risques et à se protéger, ainsi que sur les capacités institutionnelles à accroître leur flexibilité à s'adapter aux changements. À cet effet, la conceptualisation de la vulnérabilité par des critères passe par la combinaison de tous les facteurs d'origine environnementale et humaine doivent être combinés afin de définir la vulnérabilité des populations, compte tenu du rôle crucial joué par les contraintes structurelles et conjoncturelles de nature socio-économique, politique et sanitaire/alimentaire dans cette région du continent Africain, et dans un contexte de climat sans cesse en évolution.

CHAPITRE II

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente la méthodologie utilisée dans notre étude. Il décrit tout d'abord la région d'étude, soit le cadre naturel et humain de la vallée de la Sirba, puis les données environnementales et socio-économiques et enfin la méthodologie proprement dite.

2.1 Géographie du bassin de la Sirba

Le Sahel est une zone climatique de transition du climat tropical vers le désert. Le Sahel africain s'étend sur près de 5500 km depuis le Sénégal jusqu'au Soudan. Aujourd'hui, le terme Sahel s'applique autant à une zone agro-climatique qu'à une entité géopolitique¹, car il regroupe un certain nombre d'États au sein d'une organisation appelée : Comité Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse au Sahel (CILSS). Ces états sont : Cap Vert, Guinée Bissau, Sénégal, Mauritanie, Gambie, Mali, Niger Burkina Faso et Tchad. Ces pays s'étendent entre le Nord désertique et la forêt tropicale verdoyante qui longe la côte maritime du Golfe de Guinée. Le territoire burkinabé est constitué par trois bassins versants internationaux qui sont : le bassin de la Volta, le bassin du Niger et le bassin de la Comoé. Ces bassins sont subdivisés en quatre bassins versants nationaux dont : le bassin du Nakanbé, le bassin du Mouhoun, le bassin du Niger, le bassin de la Comoé.

Le bassin versant de la Sirba, situé à l'Est du pays est un sous bassin du bassin versant international du fleuve Niger. Il s'étend entre le Burkina Faso et le Niger, sur près de 38 750 km² et la partie burkinabé occupe plus de 80 % de sa superficie totale (cf. figure 2.1). La Sirba est l'un des plus importants affluents de la rive nord est du fleuve Niger dans la région du Liptako Gourma (sud-ouest du Niger, l'est du Burkina Faso et la partie frontalière

¹ Le Sahel est une zone climatique composée des pays dont : le Cap Vert, la Guinée Bissau, le Sénégal, la Mauritanie, la Gambie, le Mali, le Niger, le Burkina Faso, le Tchad, et le Soudan. Tandis que l'entité géopolitique définit les neuf premiers pays sahéliens membre du CILSS.

adjacente du Mali). Le Bassin de la Sirba, est compris entre les latitudes 12°55'54''-14°23'30''N et les longitudes 1°27'W et -1°23'42'E. Selon le rapport de Sawadogo (2002) et les cartes topographiques et administratives du Burkina Faso et du Niger, le bassin de la Sirba couvre tout ou en partie les huit provinces du Burkina Faso (Ganzourgou, Gnagna, Gourma, Kourittenga, Namentenga, Sanmatenga, Seno et Soum), et trois départements de Tillabéry au Niger Kollo, Say et Téra ; (cf. figure 2.2).

Le bassin de la Sirba compte 1 105 209 habitants avec une densité moyenne de 28,6 habitants/km². La population de la région est composée principalement de trois groupes sociaux : les Gulmacema, autochtones et majoritaires, les Mossé et les Peuls. Les deux premiers groupes sont des agriculteurs sédentaires qui pratiquent de plus en plus l'élevage. Les Peuls, éleveurs de tradition, s'adonnent également de plus en plus à l'agriculture.

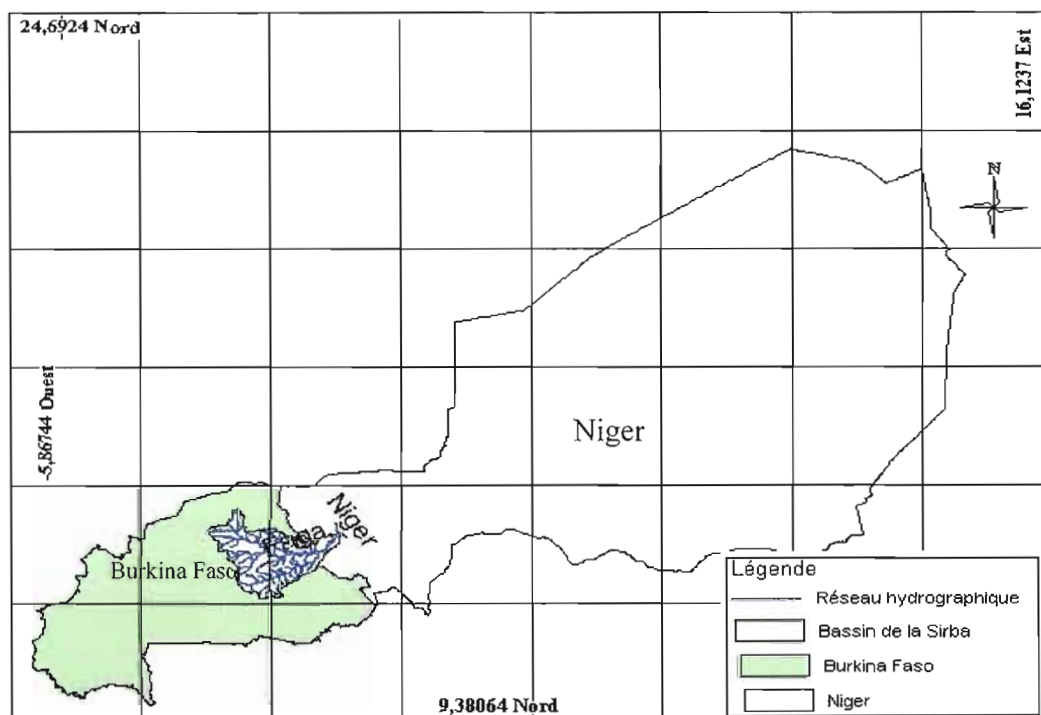


Figure 2.1 Localisation du bassin de la Sirba au Burkina Faso et au Niger (Source : Centre Régional AGRHYMET, 2004)



Figure 2.2 Division administrative du bassin de la Sirba selon les différentes provinces. (Source : Centre Régional AGRHYMET, 2004)

2.1.1 Géologie, géomorphologie et biogéographie du bassin

Les études réalisées par Savadogo (2004) indiquent que la géologie du Burkina Faso est dominée par deux grandes formations : les granites et les formations du birrimien. Le socle cristallin qui occupe la majeure partie du pays (environ 82%) et les zones sédimentaires (18%). Les arènes granitiques, les éboulis chaotiques des falaises et les reliefs tabulaires cuirassés donnent une allure monotone au paysage, d'une vaste pénéplaine rabotée par l'érosion. Le birrimien est composé par des roches vertes, des amphibolites schistes rouges ou violacés et des quartzites.

Le relief d'ensemble du bassin versant est faiblement accidenté. La géomorphologie est dominée par la présence de vastes plaines alluviales et de quelques buttes cuirassées avec par endroit des affleurements rocheux (granite). Ces buttes sont reliées aux plaines et aux cours d'eau par des glacis (cuirassés ou non) dont la pente varie entre 2 à 3%. Ils sont le lieu du ruissellement des eaux de pluie, du déplacement des éléments solides et de l'évolution des sols. L'altitude moyenne est de 280 m avec quelques pics atteignant 320 m à 450 m et correspondant aux collines épargnées par l'érosion (cf. figure 2.3).

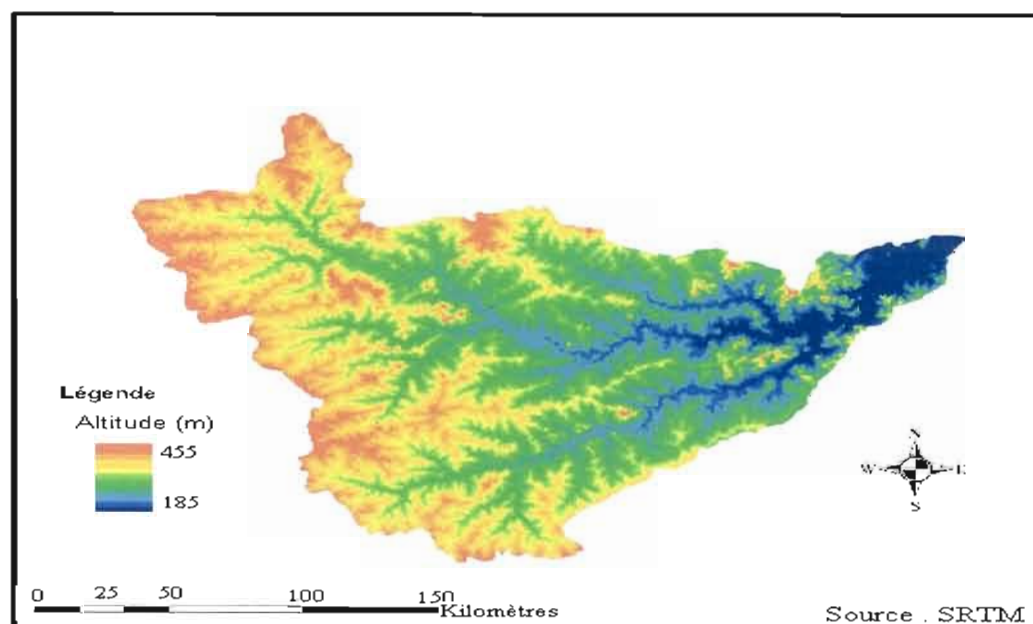


Figure 2.3 Carte d'altitude (en m) établie à partir du modèle numérique de terrain de la Sirba (Source : Centre Régional AGRHYMET, 2004)

La pédologie du bassin est liée à l'évolution pédogéomorphologique et du climat de la région, la nature des sols ressemblant à celle du Nord-Est du Burkina Faso, où le phénomène d'érosion est très intense (Bremant, 1998). L'altération des matériaux plus récents et les dérivés des arénacés ou des roches saines, ont abouti à la formation d'argiles montmorillonitiques (Kessler *et al.*, 1995). On trouve deux types de sols : premièrement ceux des régions sur roches cristallines composés de matériaux kaolinitiques anciens et ceux issus de matériaux d'altération montmorillonitiques. Les premiers ont une faible fertilité et les seconds une fertilité assez élevée, les deux ayant un drainage important. Ces deux types de sols hydromorphes et ferrugineux forment l'essentiel des terres de culture.

Les formations végétales vont de la savane arborée à la savane herbacée. Ces formations végétales sont très dégradées à cause des actions anthropiques notamment le surpâturage (Devineau et Serpantié, 1991). Elles sont remplacées aux abords des cours d'eau, par la forêt galerie et une savane arborée claire. Cependant, quelques îlots à steppes arbustives typiques du paysage sahélien sont également rencontrés dans la partie nord du bassin versant (Sawadogo *et al.*, 2002, Boulain, 2004). Les espèces arborées couramment rencontrées sont

Adansonia digitata (baobab), *Vitellaria paradoxa* (karité), *Lanea micricarpa* (raisinier), *Mitragina inermis*, *Parkia biglobosa* (néré) etc. Les espèces arbustives, sont entre autres *Pilostigma reticulata*, *Combretum michrantom*, (kinkeliba) *Guiera senegalensis*, *Combretum glutinosum*, etc. Le couvert herbacé est dominé par les graminées comme *Andropogon gayanus*, *penissetum*.

2.1.2 Climat

Par sa latitude, le bassin de la Sirba jouit d'un climat tropical de type soudano-sahélien. De façon générale, le bassin de la Sirba subit l'influence de trois sous-zones climatiques définies selon la quantité de précipitation qui décroît du Sud vers le Nord, soit:

- La zone sud soudanienne avec une pluviosité moyenne annuelle comprise entre 700 et 800 mm. Elle est située au sud du parallèle 11°30'N;
- La zone nord soudanienne avec une pluviosité annuelle moyenne allant de 550 mm à 650 mm. Elle est située entre les parallèles 11°30' et 14°N;
- La zone sahélienne au nord de 14°N avec une pluviosité annuelle moyenne 300mm à 500 mm

La période humide est limitée dans le temps (d'avril à octobre) et varie dans l'espace. Le maximum pluviométrique s'observe en été et résulte de la migration saisonnière orientée sud-ouest/nord-est de la zone de convergence intertropicale (ZCIT). La durée de la saison sèche augmente au fur et à mesure que l'on remonte vers le nord du bassin. Elle varie de six à sept mois dans les provinces situées au sud, tandis qu'à l'est et au nord, elle s'étend sur huit mois (Fada N'Gourma, Zorgho), elle est de six à sept mois tandis qu'à l'est et au nord, elle s'étend sur huit mois. Les plus grandes quantités de pluie sont recueillies au cours des mois de juillet et d'août et ce, peu importe la région. L'évaporation est très forte et dépasse la quantité moyenne annuelle de précipitations. À Dori l'évaporation moyenne mensuelle était 158 mm pour une pluviométrie de 43 mm. Les températures sont élevées tout au cours de l'année, avec une moyenne annuelle de 29° C sur la période 1961-2004 (cf. tableau 2.1). L'humidité relative est très variable avec 51% en moyenne annuelle, et peut atteindre les valeurs maximales de 90 à 96 % durant la saison humide (cf. tableau 2.2).

Tableau 2.1 Températures (en °C) moyennes mensuelles maximales (Tmax), minimales (Tmin) et moyennes (Tmoy) à Dori et à Fada N'Gourma sur la période 1961-1990. (Direction de la Météorologie Nationale du Burkina Faso).

Mois	Dori				Fada N'Gourma			
	Tmax	Tmin	Tmoy	Écart-type	Tmax	Tmin	Tmoy	Écart-type
Janvier	32,9	14,3	23,6	1,6	33,9	16,9	25,4	1,6
Février	35,9	16,6	26,3	1,6	36,5	19,5	28,0	1,6
Mars	39,3	20,9	30,1	1,4	38,9	23,3	31,1	1,4
Avril	41,7	25,1	33,4	1,3	39,4	25,3	32,3	1,3
Mai	41,4	27,4	34,4	1,2	37,1	25,4	31,3	1,2
Juin	38,5	26,1	32,3	1,2	34,0	23,4	28,7	1,2
Juillet	35,2	24,2	29,7	1,1	31,4	22,3	26,9	1,1
Août	33,5	23,4	28,4	1,2	30,4	21,7	26,1	1,2
Septembre	35,6	23,7	29,7	1,3	31,5	21,6	26,6	1,3
Octobre	38,7	23,2	31,0	1,3	35,2	21,6	28,4	1,3
Novembre	37,1	18,2	27,6	1,3	36,2	18,6	27,4	1,3
Décembre	33,5	14,9	24,2	1,3	34,2	16,8	25,5	1,3
Moyenne Annuelle	37,0	21,5	29,2	1,3	34,9	21,4	28,1	1,3

Tableau 2.2 Humidité relative maximum, minimum et moyenne (en %) et évapotranspiration (ETP) moyenne (en mm) mensuelle à Dori et à Fada N'Gourma sur la période 1961-1990. (Direction de la Météorologie Nationale du Burkina Faso).

Mois	Dori				Fada N'Gourma			
	Humidité (%)		ETP (mm)		Humidité (%)		ETP (mm)	
	Max	Min	Moy	Moy.	Max	Min	Moy	Moy
Janvier	37,2	14,2	25,7	177,1	36,0	14,2	25,1	195,0
Février	33,2	12,2	22,7	171,9	31,8	12,2	22,0	186,6
Mars	40,6	14,8	27,7	208,0	37,2	14,8	26,0	207,5
Avril	62,2	23,3	42,7	198,3	60,5	23,3	41,9	190,5
Mai	78,5	36,1	57,3	201,3	76,3	36,1	56,2	177,7
Juin	86,7	47,5	67,1	176,8	85,4	47,5	66,5	140,7
Juillet	93,9	57,5	75,7	154,0	93,6	57,5	75,6	123,8
Août	96,9	63,5	80,2	141,4	96,6	63,5	80,1	117,9
Septembre	96,9	59,6	78,3	153,2	96,5	59,6	78,1	127,8
Octobre	90,8	38,9	64,8	179,7	89,6	38,9	64,3	163,0
Novembre	65,3	19,7	42,5	173,1	62,4	19,7	41,1	170,7
Décembre	45,0	15,6	30,3	168,4	42,5	15,6	29,1	184,3
Moyenne Annuelle	68,9	33,6	51,3	175,3	67,4	33,6	50,5	165,5

Tel que décrit au chapitre 1, le climat sahélien a connu de nombreuses alternances de régime humide et sec en raison notamment d'un long processus de changements environnementaux amorcés depuis la fin du dernier maximum glaciaire jusqu'à nos jours. Ces changements se sont manifestés par une modification du régime de mousson accompagnée par une forte dégradation des ressources naturelles (eau, sol, et végétation).

Parmi les causes avancées de ces alternances phases humides/sèches, la modification des températures de surface dans le Golfe de Guinée (Bourlès, 2003) et de l'effet El-Nino (Trzaska et Janicot, 2003) ont été suggérées, ceux-ci influençant l'intensité et l'avancée de la ZCIT à l'intérieur des terres. De plus, le déboisement, consécutif à l'augmentation des besoins alimentaires des populations, a également été évoqué par certains auteurs comme causes possibles de la sécheresse (cf. Aubréville, 1949; Charney, 1975; Charney *et al.*, 1977; Lebel *et al.*, 2003; Bigot *et al.*, 2005). De ce constat global moyen, cette région comme la plupart des régions sahéliennes connaît une forte variabilité intra-saisonnière et interannuelle dans le régime de précipitation, comme nous le verrons dans le chapitre 3.

2.1.3 Hydrographie

Le réseau hydrographique, relativement dense est constitué par la Sirba d'une part, et d'autre part, par les principaux affluents dont la Faga et le Yéli et les eaux de barrages artificiels construits à partir de 1949 (cf. figure 2.4) sur les cours d'eau du bassin. La Sirba a un régime hydrologique de type sahélien, compte tenu du régime pluvial décrit précédemment. Elle se distingue par la non pérennité des écoulements. Son fonctionnement est exoréique, les écoulements produits sur les versants en rive nord est sont drainés jusqu'au fleuve Niger (Savadogo, 2004). Au niveau du lit supérieur de la Sirba, se trouve une série de dépressions ayant un écoulement intermittent. Néanmoins certains tronçons de la Sirba ont de l'eau en permanence, lors des années les plus humides. Localement, la Sirba joue un rôle important dans le régime hydrologique du fleuve Niger dans la région de Niamey, car elle participe à sa crue soudanienne en septembre (Taweye, 1995). Deux affluents majeurs, la Faga et le Yéli rejoignent la Sirba à proximité de la frontière entre le Niger et le Burkina Faso. La Faga forme l'affluent le plus important du bassin atteignant 360 km de longueur. L'exutoire du bassin est situé en territoire Nigérien à Garbékourou, à partir duquel les écoulements se poursuivent jusqu'au fleuve Niger.

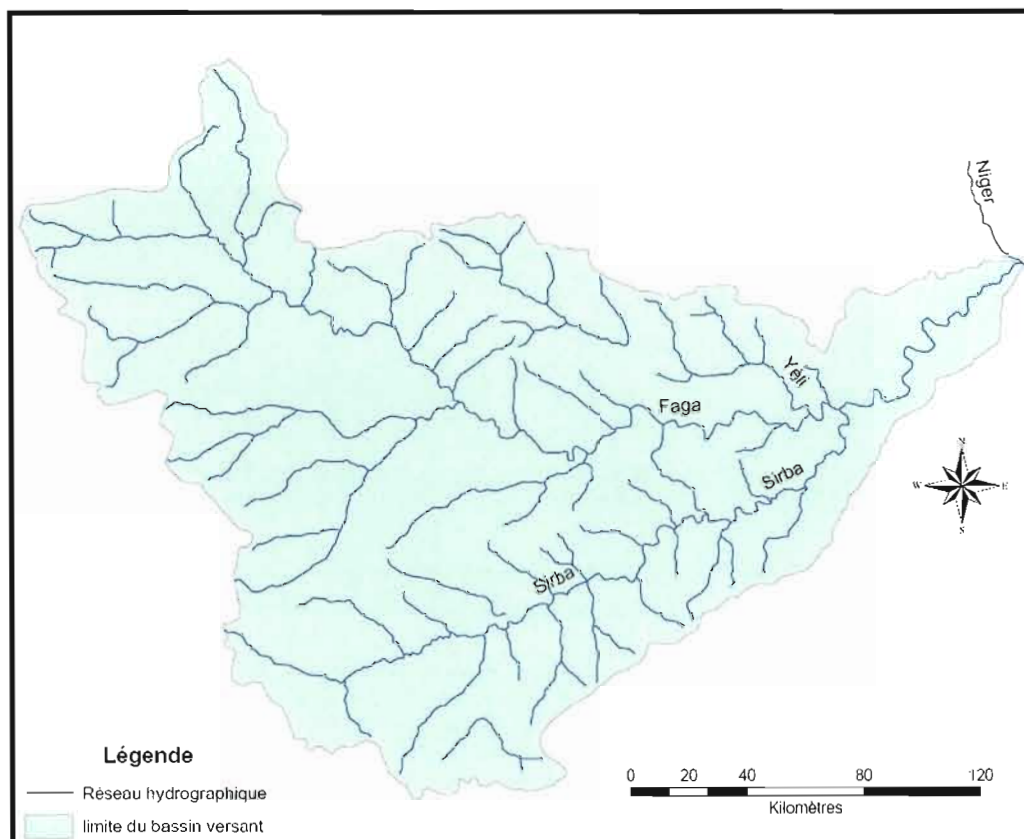


Figure 2.4 Réseau hydrographique du bassin de la Sirba (Source : AGRHYMET, 2004).

2.2 Méthodologie

Notre recherche est inductive, compte tenu du caractère multidimensionnel de la vulnérabilité. Elle consiste à relier un grand nombre d'indicateurs quantifiables à la vulnérabilité afin d'identifier les facteurs qui sont statistiquement significatifs. Cette approche comporte trois étapes : la conceptualisation de la vulnérabilité, la caractérisation des principaux facteurs de la vulnérabilité, le développement et l'analyse des critères. La première étape consistait à consulter des ouvrages scientifiques afin de faire l'état des connaissances sur la vulnérabilité des populations au changement climatique. Les résultats de cette recherche est une synthèse sur les définitions les concepts, les approches utilisées (i.e. chapitre I).

2.2.1 Démarche utilisée pour la caractérisation de la zone d'étude

L'approche méthodologique utilisée pour analyser et combiner les données de différentes sources présentées dans la section suivante, comprend trois grandes étapes :

- L'évaluation des risques physiques liés à la variabilité du climat et aux modifications environnementales. Cette étape porte sur les facteurs environnementaux comportant des risques pour les humains ;
- L'évaluation de la vulnérabilité des populations en relation avec les principaux facteurs socio-économiques. Ces derniers déterminent comment les populations peuvent ou pas s'adapter aux risques environnementaux
- Le regroupement et la combinaison des principaux facteurs environnementaux et socio-économiques fondamentaux devant servir au développement des critères de vulnérabilité des populations face à la variabilité du régime de précipitations selon le contexte socio-économique propre à la région sahélienne.

Ceux-ci ont nécessité une collecte et l'analyse de l'ensemble des informations disponibles permettant d'identifier les principaux facteurs qui caractérisent la vulnérabilité des populations sur le bassin de la Sirba. Les étapes méthodologiques suivantes ont été réalisées en tenant compte des objectifs énoncés. La démarche générale est présentée dans le schéma méthodologique (cf. figure 2.5).

2.2.2 Acquisition des données

L'acquisition des données est basée sur trois types d'approche : la recherche documentaire, l'interprétation des images de télédétection et l'enquête de terrain. Une mission de terrain a été organisée du mois d'août au mois de décembre 2005 à Niamey au Niger, et au Burkina Faso, afin de dresser l'inventaire le plus exhaustif possible des informations disponibles et collecter les données de nature environnementale et socio-économique dans la vallée de la Sirba. L'acquisition de ces informations consistait à faire une recherche documentaire, une enquête de terrain et une interprétation d'images pour obtenir des données climatiques, hydrologiques, environnementales et socioéconomiques. Ces informations et les données disponibles ont été obtenues à même les centres documentaires et de recherche (ex. AGRHYMET au Niger) de ces deux pays.

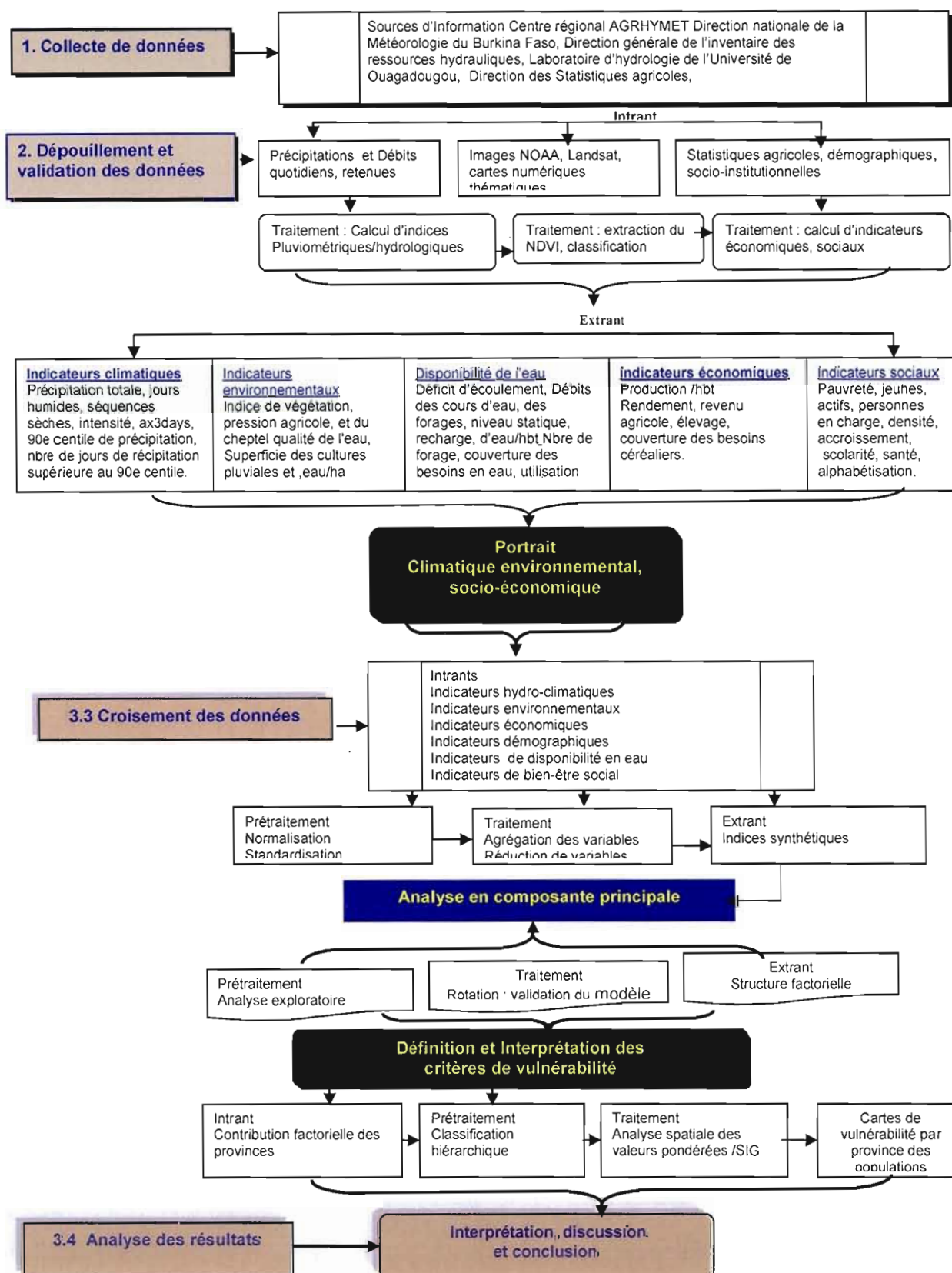


Figure 2.5 Schéma méthodologique

a) Collecte des données au Centre Régional AGRHYMET au Niger

Elle consistait à faire des prises de contact dans les différents services concernés pour faire l'état de la disponibilité des données, à collecter, les données disponibles et à réaliser une recherche bibliographique au centre de documentation. Les données collectées proviennent du système TDBASE et portent essentiellement sur les paramètres climatiques (pluviométrie), hydrologiques, satellitaires et économiques. Les services contactés sont : Unité Gestion des Ressources Naturelles/Lutte contre la Désertification ; Unité Méthodes et applications et Unité Sécurité Alimentaire.

b) Collecte des données au Burkina Faso

La collecte au Burkina Faso a été réalisée en deux étapes : la recherche documentaire à Ouagadougou et l'enquête de terrain sur le site du Projet. La recherche documentaire a été consacrée à la consultation des banques de données dans les différents services et institutions du Burkina Faso (Ouagadougou). Ces données sont constituées des séries chronologiques de précipitations et des débits à différents endroits de la Sirba et, les informations sur les ressources d'eau souterraines (piézométrie) concernent les forages et les puits améliorés sur le bassin de la Sirba.

Les informations socio-économiques collectées sont des données disponibles sur l'agriculture, l'élevage, la démographie, la santé et l'éducation ainsi que les informations institutionnelles. Cette collecte a été complétée par une recherche bibliographique dans les services consultés. Les ouvrages, rapports et documents existants sur la région ont été consultés. Ce qui a aidé de rassembler un certain nombre de documents utiles à la compréhension de la vulnérabilité des populations dans les pays sahéliens en général et en particulier au Burkina Faso et au Niger. Une base de données référencées a été constituée dans le but de réaliser d'une part, le portrait climatique, hydrologique, environnemental et socioéconomiques (cf. tableau 2.3). du bassin afin de dégager les facteurs fondamentaux de la vulnérabilité des populations du bassin de la Sirba face à variabilité et au changement du climat. Les informations collectées par cette approche, ont été complétées par les données d'enquête.

c) Enquête sur le terrain

Une enquête de terrain a été organisée par l'intermédiaire d'entretiens individuels ou de groupe à l'aide d'un questionnaire établi au préalable (cf. Annexe A). Le but de l'enquête de terrain était de voir comment la variabilité du climat est vécue au niveau du village et de l'individu afin d'identifier les indicateurs pertinents de vulnérabilité. Ce travail a été réalisé en deux temps : une première mission de terrain a été réalisée par Mr. Baldé (2004) dans le cadre de son stage au Projet d'Appui à l'Adaptation dans les pays sahéliens et la mission de terrain dans le cadre de la thèse en 2005. Ces deux enquêtes ont ciblé seulement 14 villages compte tenu des difficultés liées à l'insécurité qui sévissait dans la majorité des localités du bassin de la Sirba. Au cours de ces enquêtes, 10 focus groupes dont quatre étaient des groupes de femmes, comprenant chacun huit individus ont été réalisés pour l'ensemble des villages concernés. Le questionnaire était axé sur les principales activités, la gestion de l'eau, l'environnement et la santé. Les différentes interviews ont permis de collecter les informations qualitatives sur la perception des populations du changement climatique et de ses impacts sur les activités socioéconomiques et les ressources naturelles du bassin.

En résumé, l'ensemble des informations collectées et utilisées dans notre étude concernent les données quantitatives et qualitatives de nature environnementale (climat, hydrologie, et occupation du sol), de nature économique (production par habitant, superficie des cultures, rendement, revenu par habitant, élevage) et de nature socio-institutionnelles (approvisionnement en eau, couverture en soins de santé). Les données couvrent des périodes variables. Les séries météorologiques concernent la période 1961-2004, les données hydrologiques, les images satellitales ne couvrent que les périodes 1989, 2001 et 1990-1999, et les statistiques socio-économiques datent de 1984 à 2004 (cf. tableau 2.3).

Tableau 2.3 Récapitulatif de l'ensemble des données par catégorie, type d'informations, échelle spatiale et temporelle et leur provenance.

<i>Catégories</i>	<i>Variables ou Informations</i>	<i>Échelle spatiale (locale)</i>	<i>Échelle temporelle</i>	<i>Source des données²</i>
Données environnementales	<u>Climatiques</u> : Précipitations quotidiennes Température, Humidité, évaporation,	Postes pluviométriques (17) Stations	1961-2004	Direction de la Météorologie Burkina Faso; AGRHYMET Niamey
	<u>Hydrologiques</u> : Débits quotidiens de la Sirba, volume des retenues /barrages, Qualité de l'eau	Stations limnométriques (8)	1963-1990 2004	DGIRH Burkina Faso, ONEA ; Laboratoire d'hydrogéologie
	<u>Occupation du sol</u> : Images Landsat 5 et Landsat 7, Images NOAA, Cartes administrative et hydrographique	Résolution : 30m 1 km Provinces 1/1000000° 1/1000000°	1989 2001 1990-1999	AGRHYMET Niamey
Données économiques	<u>Agriculture</u> : Superficie, Production vivrière/habitant, de rente, unité/culture/hectare	Province	1984-2004 1990 2004	Statistique, Agricole et de la planification de l'élevage
Infrastructures socio-institutionnelles Infrastructure	<u>Sociales</u> Scolarité, alphabétisation, santé, démographie	Provinces, pays Provinces village	1984-2004	MEB
	<u>Approvisionnement en eau</u> Inventaire des puits et forages	Provinces, pays Provinces village	1947-2004	DGIRH Burkina Faso, ONEA ;

² MEB = Ministère de l'Enseignement de Base, ONEA : Office National d'Eau et d'Assainissement; DGIRH : Direction Générale de l'Inventaire des Ressources Hydrauliques Burkina Faso; INSD : Institut National des Statistiques Démographiques.

2.2.3 Données et méthodes de traitement

En Afrique sahélienne, les grands problèmes environnementaux et socio-économiques sont essentiellement liés, de près ou de loin, à la dégradation des sols au déboisement des habitats naturels, au manque d'eau, aux sécheresses récurrentes, aux inondations à la pauvreté et manque d'accès aux services essentiels. Pour appréhender ces phénomènes sur le bassin de la Sirba, nous avons utilisé d'une part, les données météorologiques et hydrologiques et les images satellitales afin d'identifier les causes d'origine physiques et les analyser, et d'autre part les données socio-économiques pour apprécier les conditions de vie des populations du bassin de la Sirba. L'analyse des données a été réalisée à l'aide de plusieurs méthodes dont : les techniques d'analyse statistiques (taux de Kendall et la pente de Sen pour les données climatiques; l'analyse en composantes principales pour les données multivariées), le traitement d'images satellitales et le système d'information géographique pour la structuration et la gestion des données et l'analyse spatiale des résultats.

2.2.3.1 Description des données climatiques

Les séries de données climatiques ont été fournies par la Direction de la Météorologie Nationale du Burkina Faso et par le Centre Régional AGRHYMET. Elles ont déjà été utilisées dans d'autres études de la zone sahélienne (Gachon *et al.*, 2007). Le réseau d'observation météorologique utilisé dans notre étude est composé de 17 stations (cf. tableau 2.4 et figure 2.6), qui vont du simple poste pluviométrique aux stations climatiques complètes dont deux sont des stations synoptiques. Deux autres stations situées à la périphérie du bassin ont été retenues comme stations de référence (Dori et Fada N'Gourma) car celles-ci fournissent les autres paramètres tels que les températures minimales et maximales, l'humidité relative et l'évaporation non disponibles à partir des postes pluviométriques. Comme le montre la figure 2.7, les stations sont inégalement réparties sur le bassin, avec une densité plus élevée de stations au sud et au centre du bassin. Les données climatiques qui ont fait l'objet d'analyse correspondent aux précipitations quotidiennes. Les périodes couvertes par les séries d'observation varient entre 55 ans (Bogandé) et 30 ans (Gayeri). Toutes les analyses ont été réalisées sur les périodes 1961-2004, (stations situées dans la partie burkinabé du bassin de la Sirba) et 1961-2002 pour les stations de Kollo, Say et Téra (Niger), celles-ci étant les périodes offrant les données les plus complètes d'une station à l'autre, i.e.

le pourcentage de données manquantes le plus faible (cf. Tableau). La moyenne normale 1961-1990 a été choisie comme référence pour le calcul des anomalies (cf. section 2.2.3.2).

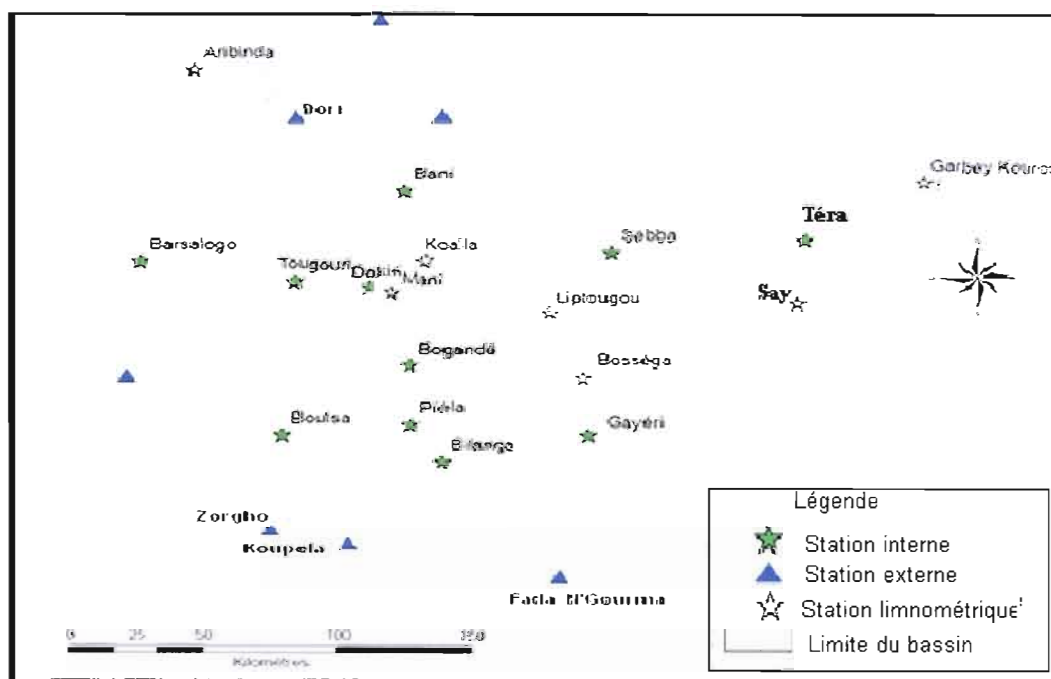


Figure 2.6 Localisation des stations pluviométriques et hydrologiques utilisées dans le bassin de la Sirba et à proximité de celui-ci.

Tableau 2.4 Localisation des stations météorologiques et pourcentage de valeurs manquantes de précipitations quotidiennes sur la période d'analyse de 1961 à 2004 (Source : Direction de la Météorologie Nationale du Burkina Faso et AGRHYMET, 2005).

Paramètres	Stations	Longitude	Latitude	Périodes	Manquantes (%)
Précipitations	Koupela	0°21'W	12°11'N	1923-2004	0
	Zorgho	0°37' W	12°15'N	1955-2004	0
	Piela	0°21'W	12°11' N	1960-2004	0
	Bilanga	0°1' W	12°33' N	1970-2004	0
	Boulsa	0°34' W	12°39' N	1958-2004	0,34
	Gayeri	0°29' E	12°39' N	1971-2004	4,4
	Bogandé	0°8' W	12°59' N	1948-2004	10,02
	Tougouri	0°8' W	12°42' N	1953-2004	0
	Dakiri	0°14' W	13°17' N	1962-2004	4
	Barsalogo	1°4' W	13°25' N	1959-2004	0,4
	Aribinda	0°52' W	14°14' N	1953-2004	2,02
	Sébba	0°4' E	14°38' N	1955-2004	1,5
	Kollo	1°37'W		1950-2002	0
	Say	0°30' W	13°19' N	1950-2002	0
	Téra			1950-2002	0
Précipitations journalière,	Dori	0°2' W	14°2' N	1923-2004	0
Températures, humidité évaporation	Fada	0°21' E	12°4' N	1922-2004	0

2.2.3.2 Méthodes de traitement et d'analyse des données climatiques

Selon la nature des données, différentes méthodes et outils statistiques ont été utilisés pour leur traitement et leur analyse. Des méthodes d'analyse multivariée utilisant la régression, et la corrélation ont été appliquées sur les séries chronologiques de précipitations afin de calculer d'une part les indices pluviométriques et d'autre part de caractériser le régime des pluies dans le temps et dans l'espace.

a) Définition et calcul des indices de précipitations

Parmi les préoccupations liées à l'évolution du climat, que ce soit dans les régions tropicales d'Afrique de l'Ouest ou ailleurs dans le monde, la modification possible de la fréquence des événements extrêmes, et pas uniquement des changements graduels dans les caractéristiques moyennes du climat, suscite un intérêt majeur dans la communauté scientifique, compte tenu de leurs effets anticipés sur l'environnement naturel et humain. Malgré leur rareté, ces événements constituent des facteurs importants de vulnérabilité des populations (Houghton *et al.*, 2001), notamment les événements extrêmes de précipitations (ou d'absence de précipitation, i.e. sécheresse) dans le contexte sahélien. Pour appréhender ces phénomènes, le recours au développement d'indices a été suggéré comme un moyen relativement simple d'analyser les changements dans les événements de précipitation ayant potentiellement un effet sur l'environnement naturel et humain (Dubuisson et Moisselin, 2006; Gachon *et al.*, 2005).

Plusieurs groupes de recherche à l'échelle internationale ont mis au point une méthodologie standard pour calculer ces indices comme par exemple le projet ETCCDMI (Expert Team Climate Detection monitoring and Indices), ou le projet européen STARDEX (STATistical and Regional dynamical Downscaling of EXtremes for European regions). Le groupe CLIVAR CLImate VARIability and predictability (Karl *et al.*, 1996 ; Karl *et al.*, 1999 ; Frich *et al.*, 2002) du WCRP (World Climate Research programme) de l'OMM (Organisation Météorologique Mondiale) ont proposé une liste de différents indices calculés à partir des séries quotidiennes des variables de surface (précipitations et températures). L'utilisation de ces indices a permis dans notre étude de mettre en évidence les liens entre les

fluctuations dans l'intensité, la fréquence et la durée des séquences humides/sèches, et les autres indicateurs de vulnérabilité des populations.

À partir des séries chronologiques de précipitations quotidiennes des 17 stations retenues (tableau 2.3) et selon la définition des indices (cf. tableau 2.5), six indices ont été calculés à savoir : (i) le pourcentage de jours humides (en utilisant un seuil de 1mm/jr) ; (ii) le nombre maximum de jours consécutifs secs ; (iii) l'intensité moyenne par jours de pluie ; (iv) le maximum de précipitation cumulée sur trois jours consécutifs ; (v) le 90^e centile de précipitation, et (vi) le nombre de jours de précipitation supérieure au 90^e centile de référence (calculé sur la période de référence 1961-1990). Les statistiques de base soit la quantité totale moyenne mensuelle de précipitation et l'écart-type intra-saisonnier ont aussi été analysés en plus des indices cités précédemment. La méthodologie utilisée pour le calcul des indices pluviométriques est fournie à l'Annexe B (cf. Gachon *et al.*, 2007). Les indices sont calculés pour chacune des stations et pour chacun des mois d'avril à octobre (pour chaque année couvrant la période de 1961 à 2004) soit la période durant laquelle la majorité des régions sahéliennes est soumise à la précipitation de mousson, correspondant en moyenne à 99 % du cumul annuel de précipitations.

Tableau 2.5 Liste des indices pluviométriques (pour plus de détails se référer à Gachon *et al.*, 2007).

Indices	Catégorie	Définition	Unité
Prcpl	Fréquence	Nombre de jour avec précipitation (seuil ≥ 1 mm)	%
SDII	Intensité	Intensité moyenne de précipitation par jour humide (seuil ≥ 1 mm)	mm/j
CDD	Fréquence	Nombre maximum de jours secs consécutifs (précipitation < 1 mm)	jour
Ma3days	Extrême	Maximum de précipitation cumulée sur trois jours	mm
Prcp90	Extrême	90e percentile de précipitation quotidienne	mm/j
R90N	Occurrence Extrême	Nombre de précipitation supérieure au 90e percentile par rapport à la période de référence 1961-90	%

b) Analyse de la variabilité interannuelle

Afin d'analyser la variabilité interannuelle des indices et des variables de base par rapport à la période de référence de 1961-1990, les anomalies standardisées ont été calculées en utilisant la formule suivante :

$$A_j = \left(\frac{x_y - \bar{x}_y}{\sigma_y} \right) \quad (1)$$

Où x est la variable considérée

Y = année

\bar{x}_y = moyenne de la variable à l'année considérée

A_j = anomalie de l'année j

\bar{x}_y = moyenne de l'indice (période considérée, avril à octobre) calculée sur la période référence de 1961 à 1990

σ_y = écart-type interannuel de l'indice y (période avril-octobre) calculé sur la période référence de 1961 à 1990

Les fluctuations à l'échelle interannuelle des précipitations moyennes sont analysées sur la période 1961-2004 à l'aide des données des tableaux C.1 à C.17 (cf. Annexe C). La moyenne mobile a été calculée sur la même période et superposées graphiquement aux anomalies interannuelles standardisées.

c) Distribution intra-saisonnière et variabilité des cumuls mensuels de précipitations

Pour les besoins d'analyse, les tableaux C.1 à C.17 (cf. Annexe C) contenant les séries chronologiques de précipitations moyennes mensuelles d'avril à octobre ont été utilisés pour caractériser le régime de distribution des précipitations sur la période 1961-2004 sur l'ensemble des stations du bassin de la Sirba. Une analyse des cumuls moyens mensuels de précipitations a été réalisée sur les moyennes normales 1961-1990 d'avril à octobre et sur les moyennes mensuelles des années 1984, 1994 et 2004 afin d'apprécier la variabilité de leur contribution par rapport à la normale climatique 1961-1990.

d) Calcul des tendances

Les données des tableaux D.1 à D.17 (cf. Annexe D) ont servi à l'analyse des tendances des indices pluviométriques des indices sur l'ensemble des stations du bassin. Les tests non paramétriques des rangs de Kendall et la méthode non paramétrique de Sen (Sen, 1985) ont été utilisés afin d'évaluer la probabilité d'une tendance significative au seuil de 95% et l'amplitude des tendances significatives, dans les séries chronologiques des indices et des variables de base sur la période 1961 à 2004 pour chaque station (présentée au Tableau 2.4). Le test de Mann-Kendall, également appelé « Kendall's tau » (Kendall, 1975), sert à calculer et à tester statistiquement la concordance entre plusieurs variables aléatoires indépendantes mesurées sur les mêmes individus. L'hypothèse nulle H_0 indique que le classement de ces variables est indépendant et que celles-ci ne sont pas corrélées. L'hypothèse alternative H_1 correspond au cas où les données de l'échantillon présentent une tendance. La statistique S du test de Mann-Kendall se définit comme suit (Gilbert, 1987) :

$$\tau = \frac{\text{Concordant} - \text{discordant}}{\sqrt{\text{concordant} + \text{discordant} + \text{sameX}} \sqrt{\text{concordant} + \text{discordant} + \text{sameY}}} \quad (2)$$

Où «concordant» est le nombre de paires pour lesquelles l'ordre relatif de x et y est le même, «discordant» lorsqu'ils sont en opposition, «sameX» lorsque les valeurs de x sont les mêmes et «sameY» sameY lorsque les y sont les mêmes. Ce test est particulièrement utile puisqu'il permet d'étudier des séries incomplètes et que les données n'ont pas besoin de se conformer à une distribution statistique. Par contre, lorsque $n \geq 40$, la statistique S est reconnue être approximativement normalement distribuée (Gilbert, 1987). Une valeur positive de τ indique une tendance croissante, alors qu'une valeur négative de τ indique une tendance décroissante. La pente de Sen (1968) consiste à calculer la médiane sur chaque paire de la série chronologique où chaque mesure est effectuée à intervalle régulier.

$$bij = \frac{X_i - X_j}{i - j} \quad (3)$$

Où : «bij» est l'estimation de la pente entre deux points X_i et X_j soit respectivement la $i^{\text{ème}}$ et la $j^{\text{ème}}$ observation ($j > i$). La pente ainsi calculée est une estimation robuste de l'amplitude de

la tendance détectée, lorsque celle-ci est statistiquement significative au seuil de 95 %. L'évolution interannuelle des indices a été analysée sur l'ensemble des provinces soit une station par province. Le chapitre III présente les résultats d'analyse de la caractérisation du régime des précipitations.

2.2.3.3 Description des données hydrologiques

Les données hydrologiques utilisées dans cette étude proviennent de la Direction Générale de l'Inventaire des Ressources Hydrauliques (DGIRH) du Burkina Faso et par l'entremise du Centre Régional AGRHYMET. Les observations ont débuté en 1956 pour la station de Garbé-Kourou gérée par l'ORSTOM, et dans les années 1970 pour les autres stations du réseau hydrométrique national (cf. figure 2.6). Comme pour les données climatiques, des lacunes ont été constatées sur les séries chronologiques des débits quotidiens. Ainsi, le nombre d'années exploitables ne couvre que 28 ans pour la station de Garbé-Kourou et une dizaine d'années pour les autres stations. Taweye (1995) mentionne que la station de jaugeage à Garbé-Kourou a fonctionné de façon sporadique sur la période de 1991 à 2002, réduisant ainsi la période exploitable aux années 1970 à 1990. Huit stations hydrologiques ont donc été inventoriées et seulement deux (Sirba à Garbé-Kourou et Faga à Liptougou) ont fait l'objet d'analyse (cf. tableau 2.6).

Tableau 2.6 Localisation des stations limnométriques utilisées et pourcentage de valeurs manquantes sur la période d'analyse de 1970 à 2002 (Source : AGRHYMET2005)

Stations	Longitude	Latitude	Périodes	Manquantes (%)
Bosségal	000°32' W	12°56' N	1973-2000	8,30
Liptougou	000°16' W	13°10' N	1973-2003	0
Manni	000°16' W	13°18' N	1973-2002	2,50
Yali à Sebba	000°30' W	13°26' N	1981-2003	0
Narbingou	000°27' W	13°33' N	1982-1994	2,8
Koalla à Koalla	0°02' W	12°38' N	1982-1990	11,30
Bilanga à Bilanga	000°08' W	13°24' N	1970-1990	14
Garbékourou	1°37' W	13°44' N	1956-2003	11,30

2.2.3.4 Méthodes de traitement et analyse de l'écoulement saisonnier de la Sirba

L'écoulement du bassin de la Sirba dépend essentiellement des précipitations compte tenu du faible niveau des nappes d'eau souterraines. La méthode de Thiessen (Dubreuil, 1974 ; Remanieras, 1980) est utilisée pour calculer la précipitation moyenne pondérée (P_{moy}) sur l'ensemble du bassin en effectuant la somme des précipitations P_i pour chaque station, multipliées par leur facteur de pondération (superficie A_i des polygones), le tout divisé par la surface totale S du bassin (cf. figure 2.7 et tableau 2.7). Elle est donnée par la formule suivante :

$$P_m = \frac{\sum A_i P_i}{S} \quad (4)$$

Où :

P_m = pluie moyenne pondérée sur le bassin (mm)

S = superficie totale du bassin (km²)

A_i = superficie des polygones attribuée à chaque station (km²)

P_i = pluie mensuelle mesurée à chaque station et ramenée en mm (mm).

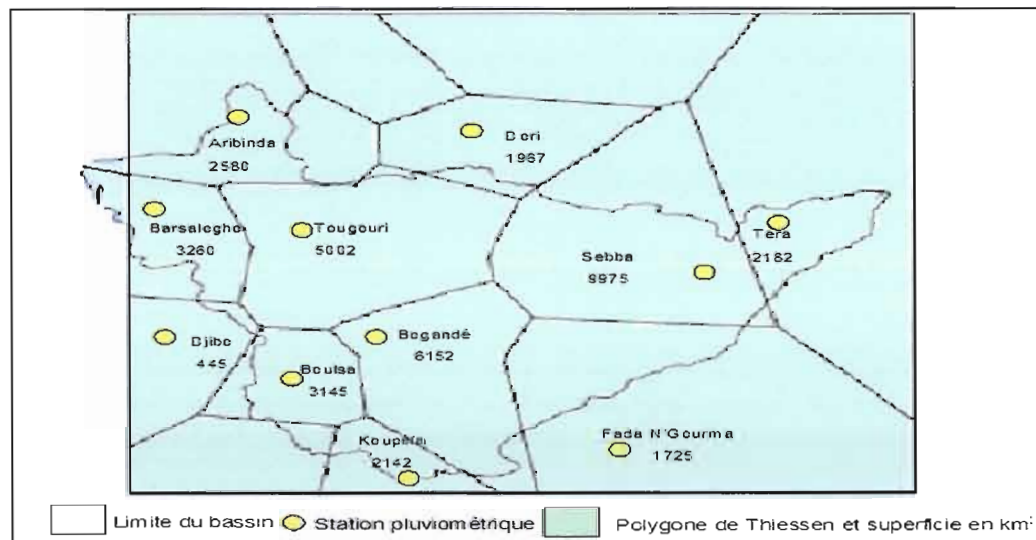


Figure 2.7 Polygone de Thiessen et superficies élémentaires dans le bassin de la Sirba.

Tableau 2.7 Superficie des polygones et coefficients de Thiessen selon les stations

Station	Superficie correspondante (Km ²)	Coefficients de Thiessen
Aribinda	2580	0,067
Barsalogho	3260	0,084
Bogandé	6152,5	0,159
Boulsa	3145	0,081
Djibo	445	0,011
Dori	1967,5	0,050
Fada	1725	0,045
Gothèye	1955	0,05
Kaya	400	0,01
Koupela	2142,5	0,05
Sebba	9975	0,257
Tougouri	5002,5	0,129

Les données du tableau 2.7 ont servi au calcul de la pluie moyenne sur le bassin (section 4.1 du chapitre 4). Le bilan hydrique a été également calculé pour évaluer le déficit d'écoulement sur le bassin. L'équation du bilan hydrique utilisée est celle de Remenieras (1980) et se présente comme suit :

$$P + R = Q + E + (R + \delta R) \quad (5)$$

où :

P = pluviométrie (mm)

R = réserve stockée par le bassin

Q = écoulement de surface (mm) annuel (1963-1990)

E = évaporation (mm)

δR = variation de la réserve (mm)

$R + \delta R$ = ressources accumulées à la fin de la période

À l'échelle annuelle, la variation de la réserve est négligeable et l'équation devient alors :

$$D = P - Q \quad (6)$$

où

D = déficit d'écoulement.

Les données des tableaux E.1 à E3 (cf. Annexe E) ont servi à l'analyse de la variabilité interannuelle des débits moyens mensuels et du volume d'eau par habitant. Les

anomalies standardisées des débits ont été calculées par rapport à la moyenne de la période : 1963-1990 pour chaque année pour la Sirba à Garbékourou et 1973-2003 pour la Faga à Liptougou (cf. tableau 2.6). Ces anomalies ont été analysées en relation avec l'évolution des précipitations moyennes. La variabilité intra-saisonnière de l'écoulement a été analysée avec l'évolution des pluies au cours de la période humide de l'année. La quantité d'eau disponible par habitant a été calculée en divisant le volume d'eau total de la Sirba et ses affluents, les retenues et barrages ainsi que les mares (cf. tableau E.3 de l'Annexe E), par la population totale du bassin de l'année 1996. Le tableau E.1 contient l'inventaire des retenues d'eau, leurs coordonnées géographiques, leurs surfaces et leurs capacités. Les résultats d'analyse des effets de la variabilité des précipitations sur l'écoulement de la Sirba sont portés au chapitre IV.

2.2.3.5 Description des données environnementales

Afin de déterminer les zones les plus affectées par la dégradation de l'environnement suite à la variabilité du régime des précipitations et à l'exploitation des terres au cours des dernières décennies, deux types de données satellitales ont été utilisés : les images NOAA-AVHRR (National Oceanographic and Atmospheric Administration) couvrant la période de 1990 à 2000, et celles de Landsat couvrant la période de 1989 à 2001. De nombreuses études ont démontré l'utilité des sources d'information satellitales, notamment pour l'analyse de la biomasse et de l'occupation du sol (ex. Rousse *et al.*, 1973; Samson et Gérard, 1991; Dubois, 1993; Wolff, 1994; Baudouin *et al.*, 1995; Gonzalez, 2002). L'évolution de la productivité végétale au cours des saisons est reconstituée ou observée à partir des satellites de la NOAA, notamment l'imagerie NOAA-AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) qui offre plusieurs avantages tels que la vision synoptique adaptable à l'étude d'un phénomène à méso-échelle, le nombre important d'informations issues des cinq canaux du radiomètre, la précision radiométrique des capteurs ($\pm 0.05\%$), et la fréquence d'acquisition (2 fois/jour) (Djaby *et al.*, 1998).

Les images utilisées dans notre étude ont toutes été obtenues auprès du Centre AGRHYMET. Le format de données AVHRR choisi est de type LAC (Local Area Coverage), avec une résolution spatiale de 1,1 km. Les canaux utilisés sont le visible (0,58-0,68 μm), permettant l'observation et le suivi de l'évolution de la biomasse au cours de

l'année dans les régions sahéliennes (Hountondji *et al.*, 2004; Ozer *et al.*, 2003; Rigina et Rasmussen, 2004). Sur les 360 images NOAA-AVHRR collectées, 240 images ont été utilisées dont deux images par mois ont été sélectionnées sur la période de 1990 à 1999. Ces images ont été géoréférencées à partir d'une projection de type UTM. Elles ont été ensuite améliorées visuellement par des étirements du contraste par le Centre Régional AGRHYMET, grâce à l'utilisation de filtres numériques en vue d'atténuer les problèmes liés aux interférences astronomiques et aux corrections géométriques. L'image Landsat 5 (MSS) de 1989, Landsat 7 (ETM+) (Enhanced Thematic Mapper Plus) de 2001 ont été utilisées. Le radiomètre ETM+ offre des images couvrant un champ d'observation de 185 x 185 km, avec une résolution spatiale de 30 m en mode multi-spectral.

Les domaines spectraux explorés concernent le visible (bleu, vert, rouge), l'infrarouge proche et moyen. Les images retenues dans notre étude sont celles d'août 1989 et 2001 pour les images Landsat, et de tous les mois de la décennie 1990-1999 pour les images NOAA-AVHRR (cf. tableau 2.8). À ces données matricielles s'ajoutent les cartes topographiques et thématiques qui ont été utilisées pour la constitution du Système d'Information Géographique (SIG). Les cartes des ressources en eau du Burkina Faso et du Niger au 1/1 000 000e, de 1990 et les cartes numériques du bassin de Sirba constituent la base des données cartographiques. D'autres données statistiques concernant l'occupation du sol dans le bassin de la Sirba ont été fournies par le SYSTBASE du Centre AGRHYMET. Il s'agit notamment du nombre d'unités de cultures et du bétail par hectare. Elles ont servi à l'analyse de l'utilisation du sol sur la période de 1970 à 2005.

Tableau 2.8 Données environnementales et cartographiques utilisées (Source : AGRHYMET).

Catégories	Année d'acquisition	Résolution	Sources
Images Landsat 5 (1 image)	1989	30 m	AGRHYMET
Images Landsat 7 (1)	2001	30 m	AGRHYMET
Images NOAA-AVHRR (240)	1990-1999	1 km	AGRHYMET
Cartes numériques des ressources en eau	2004 1991	1/1 000 000e 1/1 000 000e	DGIRH
Unité de culture par hectare	1970-2005	province	AGRHYMET
Unité de bétail par hectare			
Qualité de l'eau des forages, puits et eau de surface	2004-2005	village	Savadogo (2004)

Les informations sur la qualité de l'eau ont été fournies par le Laboratoire d'hydrogéologie de l'université du Burkina Faso. Elles portent sur les résultats d'analyses des eaux des forages, des puits modernes et traditionnels et les eaux de surface. Les données sur les maladies hydriques ont été obtenues par enquête dans le District sanitaire de Boulsa au Burkina Faso. Elles ont servi à l'évaluation des impacts de la pollution hydriques sur la santé des populations à Boulsa dans la province de Namentenga en 2005 au cours cinq (5) années d'observation (2001-2005).

2.2.3.6 Traitement des données environnementales

Des techniques de traitement d'images satellitales ont été employées afin d'extraire les informations sur l'état d'évolution de la végétation et de l'occupation des sols. Afin d'optimiser l'information obtenue, les scènes satellitales originales ont subi un prétraitement en vue d'atténuer les erreurs de mesure liées aux interférences atmosphériques et aux corrections géométriques. L'indice de végétation a été calculé à partir de mesures journalières, puis moyenné afin de produire une synthèse hebdomadaire où les effets des nuages et des phénomènes atmosphériques ont été réduits. Ces opérations ont été effectuées au préalable par le Centre AGRHYMET. Le traitement de l'information satellitale consiste à extraire le NDVI (Normalized Difference Vegetation index) à partir des images NOAA et Landsat 7.

Le NDVI fait partie des nombreux indices dérivés des mesures de réflectance spectrale dans différentes bandes de longueur d'onde. Mis au point par Rouse *et al.* (1973), le NDVI est très utilisé car il est facile à mettre en œuvre et fonctionne dans la majorité des cas (Huete, 1989). Toutes les surfaces absorbent dans l'Infrarouge lointain (IR : 3 μm à 1 000 μm) mais les revêtements végétaux absorbent peu dans le proche Infra rouge (PIR : 0,78 μm à 1,4 μm). Par conséquent, la différence entre les deux mesures est une mesure du NDVI. Dans le rouge, l'intensité du rayonnement diminue avec l'augmentation de la biomasse verte par suite d'une absorption de la radiation incidente par la chlorophylle des plantes. Dans le proche infrarouge, elle augmente légèrement avec l'augmentation de la biomasse verte par suite de la diffusion des radiations par les parois hydratées des cellules foliaires (Hiernaux, 1986). La définition du NDVI est donnée par la formule suivante :

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R} \quad (7)$$

où IR= Infrarouge lointain et R = Infrarouge.

Dans le cas du satellite NOAA, le capteur est pourvu de cinq canaux dont deux sont utilisés pour le calcul du NDVI : le visible (0,58 à 0,68 μm =Bande 1) et le proche infrarouge (0,73 à 1,10 μm =Bande 2). Le NDVI est mesuré suivant la formule équivalente:

$$(AVHRR) \text{ NDVI} = \frac{\text{Bande2} - \text{Bande1}}{\text{Bande2} + \text{Bande1}} \quad (8)$$

Le traitement consiste à extraire les NDVI mensuels à partir d'images NOAA prétraitées selon les formules indiquées ci-dessus (équation 8) en utilisant le logiciel IDRISI. Il s'agit dans un premier temps, de calculer le NDVI sur l'ensemble du bassin puis dans différentes formations végétales pour apprécier sa variabilité dans le temps et dans l'espace afin de déceler les changements possibles au cours des dix années de données disponibles (1990-1999, cf. tableau 2.8). Les images du NDVI entre les années 1990 et 1999 ont été sélectionnées afin d'analyser l'évolution saisonnière et interannuelle de l'indices de végétation (cf. Annexe G). Une relation a pu être établie entre l'évolution de l'indice de végétation et celle des cumuls mensuels de précipitations pour la même période, afin d'apprécier l'effet des fluctuations du régime des pluies sur le couvert végétal. Cette opération rend compte de phénomènes concomitants sur une même image (Bonn, 1996 ; Bourcier, 1994).

Les bandes Landsat multispectrales TM5 pour l'année 1989 et TM7 pour l'année 2001 ont été également utilisées pour détecter les changements intervenus entre ces deux années, soit ceux liés à d'éventuelles causes naturelles (i.e. via le régime de précipitations) ou anthropiques (i.e. pratiques culturelles). Parmi les différentes méthodes suggérées pour la détection du changement, l'analyse en composantes principales (ACP) est la plus souvent utilisée (Byrne *et al.*, 1980). Cette méthode d'analyse statistique multivariée sert à réduire le nombre de composantes spectrales et rend mieux compte de la variance des images multispectrales originelles. Les pixels inchangés se retrouvent dans les premières composantes et prennent les valeurs proches de 0 et ceux liés au changement dans les dernières composantes prennent des valeurs plus importantes (Byrne et Craper, 1980). Elle se

réalise à partir de deux bandes privilégiées au lieu de toutes les bandes spectrales. Les bandes choisies pour effectuer l'analyse en composantes principales ont été les bandes proches infrarouges (0,7 μ m-1,1 μ m). Afin de consolider les résultats liés à ce traitement, les valeurs de NDVI de deux années différentes ont été comparées (1990 et 1999) pour le mois d'août. La fonction de l'ACP disponible dans le logiciel IDRISI a servi à la détecter des changements. Les logiciels Excel et SPSS ont été utilisés pour le traitement statistique et les logiciels IDRISI, Geomatica V10.0, pour le traitement des images proprement dit, ainsi que Arc GIS 9.2, MapInfo 8.5 pour la structuration, la gestion des données et la réalisation des cartes dérivées.

La carte des changements dans l'occupation du sol a été réalisée en prenant modèle sur celle accomplie par le Centre AGRHYMET (2004) afin de dégager les grands traits des changements au niveau du bassin. La classification supervisée a été effectuée sur l'image Landsat 5 du mois d'août 1989 et l'image Landsat 7 de même résolution du mois d'août 2001. Le filtre mode d'IDRISI a été appliqué afin d'améliorer la qualité des images. Les images ont été classifiées en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance sur l'ensemble de l'image à l'aide du logiciel PCI.

2.2.3.7 Description des données socio-économiques et infrastructures publiques

Les données utilisées pour l'analyse socio-économique du bassin ont été collectées sur le terrain lors d'enquêtes menées au Burkina Faso et au Niger. Des entrevues ont été organisées avec les populations sur la base d'un questionnaire et de visites dans les services et les institutions. La collecte des données quantitatives a été privilégiée, soit les statistiques agricoles et pastorales, l'inventaire des infrastructures hydrauliques, les statistiques démographiques, le niveau d'éducation et les statistiques sur la santé. Les données socio-économiques sont à l'échelle des provinces, car la majorité des informations collectées ne sont pas disponibles au niveau du village et des départements (cf. Tableau 2.9). Toutefois, les informations collectées par des entrevues sont à l'échelle des villages (cf. Figure 2.8).

Tableau 2.9 Données socio-économiques et démographiques collectées auprès des institutions au Niger et au Burkina Faso et lors des entrevues organisées en 2005.

<i>Nature</i>	<i>Caractéristiques</i>	<i>Échelle temporelle</i>	<i>Échelle spatiale</i>	<i>Source</i>
Économie	Agriculture : Superficies des cultures pluviales, Superficies des cultures irriguées, Unité de culture par hectare, Production par habitant	1984-2004 1970-2004	Province	Direction des Statistiques agricole
	Rendement des cultures Élevage : Effectif du cheptel, composition Revenus de l'élevage PIB/habitant	1984-2004	Province	planification de l'élevage DGIRH ³
Éducation	Taux de scolarisation alphabétisation	2004-2005	Province	MEB; Burkina INSD
Démographie	Population rurale et urbaine Taux d'accroissement	1996	Province	
Santé	Nombre d'établissement hospitalier par district, maladies liées à l'eau	1985-2004 2004	Province	
Hydraulique	Localisation, nombre de forage, type, état, utilisation	2004	Village	DGIRH ONEA

Elles concernent le mode d'accès aux ressources en eau, les activités pratiquées, les stratégies utilisées pour faire face à la sécheresse ainsi que les impacts et contraintes en cas de sécheresse prolongée. D'autres informations institutionnelles issues de la base de données statistiques du Burkina Faso ont été utilisées afin de réaliser une comparaison avec les données au niveau provincial.

2.2.3.8 Traitement des données socio-économiques et démographiques

a) Données socio-économiques

Les données économiques sont constituées de séries chronologiques de la production agricole par province et par habitant, des rendements à l'hectare et de la superficie de terre cultivable par habitant par année sur la période 1984-2004 (cf. Annexe

³ MEB = Ministère de l'Enseignement de Base, ONEA : Office National d'Eau et d'Assainissement; DGIRH : Direction Générale de l'Inventaire des Ressources Hydrauliques Burkina Faso; INSD : Institut National des Statistiques Démographiques

H). Connaissant la norme de consommation : 190 kg de céréale par habitant et par an au Burkina Faso et 240 Kg de céréale par habitat et par an dans les trois départements du bassin au Niger (CILSS, 2001), on a calculé un Taux de Couverture des Besoins Céréaliers par habitant (TCBC) selon la méthode adoptée par le Projet Ap3A (2001). Ce taux s'obtient en additionnant les taux de couverture issus de l'agriculture (TCBC_A) et de l'élevage (TCBC_E) selon la formule suivante :

$$TCBC_T = (TCBC_A + TCBC_E) \quad (9)$$

Ces taux de couverture céréaliers par habitants ont été analysés pour toutes les provinces sur la période 1984 à 2004. Toutes les autres activités complémentaires ont également été analysées telles les cultures de rente, l'élevage de petits ruminants, le petit commerce et les activités d'orpaillage et de cueillette qui constituent des sources de revenus supplémentaires, et qui contribuent à la satisfaction des besoins céréaliers des populations du bassin, en cas de sécheresse prolongée. En plus du taux de couverture alimentaire comme indicateur de vulnérabilité, nous avons analysé les effets de la variabilité des indices pluviométriques sur la production céréalière par habitant en appliquant la régression multiple sur ces variables sur la période 1984-2004, en considérant la production céréalière comme variable dépendante et les indices pluviométriques comme variables explicatives (indépendantes).

b) Données démographiques

D'après le recensement de la population en 1996 (INSD, 1996), la structure par âge se présentait comme suite :

0-4 ans

5-9 ans,

10-14 ans,

15-19 ans,

20-64 ans

65 ans et plus.

Cette structure de la population a été répartie en trois grands groupes d'âge selon la proportion de chacun des groupes par rapport à la population totale, soit, les jeunes, les

adultes et les vieillards. À partir de ces données, nous avons calculé le nombre de personnes à charge par adulte actif.

c) Données d'inventaire des infrastructures socio-institutionnelles

Les données d'inventaire des points d'eau ont servi au calcul du nombre d'infrastructures hydrauliques par province. Selon la Direction Générale de l'Inventaire des Ressources Hydrauliques (DGRH), Ouagadougou au Burkina Faso, la norme de desserte est de 300 personnes par point d'eau. Celle-ci a été utilisée afin de calculer le pourcentage de population ayant accès à l'eau potable par province et selon la formule suivante :

Taux de couverture = Nombre de points d'eau/besoins théoriques.

Les besoins théoriques ont été obtenus en divisant l'effectif de la population totale par province par la norme théorique de 300 habitants (norme théorique) par point d'eau. La vulnérabilité des populations vis-à-vis des ressources en eau potable a été évaluée en comparant ces taux par rapport à la norme admise par l'OMS (2007), soit 1000 m³/habitant/an. La couverture sanitaire a été calculée en fonction du nombre de médecins par tranche de population de 10 000 et comparée à la moyenne nationale du pays.

2.2.4 Croisement des données

Cette section aborde les méthodes utilisées pour le développement et l'analyse des critères multivariés de vulnérabilité. Dans la définition des critères, les causes déterminantes d'origine sociale et environnementale issues de la caractérisation de la zone d'étude ont été regroupées et utilisées pour la construction des indicateurs, en insistant sur la combinaison optimale des indices afin d'expliquer la vulnérabilité observée face aux désastres d'origine climatique. En raison de l'absence de séries chronologiques continues des données socio-économiques par rapport aux données environnementales, l'analyse de la vulnérabilité à l'échelle de la province a été réalisée sur trois années caractéristiques, soit les années 1984, 1994 et 2004 (Cf. Annexe I), pour lesquelles nous possédions la quasi-totalité de l'information (cf. Tableau 2.7). Ces années correspondent respectivement à des années sèche, humide et moyenne (cf. section 3. 1.2) comme nous le verrons dans la suite. Toutefois, bien que la majorité des informations soient disponibles pour ces années (cf. Annexe I), certains facteurs comme l'indice de végétation ou l'indice de pauvreté n'était pas disponible pour

l'année 2004. Ils ont été remplacés par les valeurs équivalentes à 1999 et 2003. Ces années se situent également parmi des années moyennes en termes de hauteur pluviométrique.

La section suivante présente une brève description des principes de l'analyse en composantes principales (ACP), utilisée pour réaliser la combinaison des variables, la définition et les étapes de la construction des indicateurs ainsi que leur agrégation en indices. La classification et l'intégration des données après l'ACP sont également abordées.

2.2.4.1 L'Analyse en Composantes Principales (ACP)

Afin de réaliser une analyse multicritère et développer les critères de vulnérabilité combinant les effets environnementaux et socio-économiques, une ACP a été réalisée sur les diverses sources de données. Cette ACP, appelée aussi « analyse géométrique des données » ou « analyse des corrélations » sert à analyser les liens entre les données multi-sources, et de les visualiser sous forme de nuages de points dans des espaces géométriques (Tabachnik *et al.*, 1996). Dans bien des recherches, chacun des sujets est mesuré par rapport à un nombre plus ou moins élevé de variables métriques $X_1, X_2 \dots X_p$. L'ACP conduit à la création de nouvelles variables $X_1', X_2' \dots X_p'$, non corrélées entre elles et à variance ordonnée, appelées composantes principales. Seul un nombre limité de ces composantes explique la plus grande partie de la variance observée (Bouroche et Saporta, 1987; Pocard, 2000). Les «composantes principales» désignent les axes orthogonaux qui structurent les données et qui rendent compte de cette variance maximale. En commençant le traitement par un fichier où les variables (Colonnes) sont sûrement corrélées entre elles, nous aboutissons grâce à l'ACP à un nouveau fichier. L'ACP vise à maximiser une bonne reproduction de la matrice de corrélation originale. Ainsi, en considérant la présence d'inter-corrélation entre les variables, on peut en extraire des dimensions plus globales, où les nouvelles variables sont les composantes principales ordonnées selon le pourcentage de variance expliquée (Var_Cp) par chacune d'elles, où.

$$Var_Cp_i = \lambda_i / \sum_{i=1}^N \lambda_i \quad (10)$$

Malheureusement, les résultats initiaux de l'ACP ne favorisent pas cette identification car cette technique a tendance à produire une première composante générale sur laquelle plusieurs variables obtiennent des pondérations. L'étape suivante de l'ACP consiste donc à transformer à nouveau la solution obtenue en appliquant une rotation aux axes servant à définir les différentes composantes. Cette transformation mathématique des vecteurs, correspondant aux composantes, préserve la variance expliquée de chaque variable, mais la réassigne à des composantes transformées.

L'intérêt majeur de l'ACP est d'offrir la meilleure visualisation possible des données multivariées, en identifiant le ou les plans dans lesquels la dispersion est maximale, mettant ainsi en évidence avec le maximum de précision les relations de proximité et d'éloignement entre les variables. En appliquant cette technique à nos données de nature et d'origine diverses, notre objectif est d'obtenir la meilleure combinaison possible des variables pour déterminer le nombre d'axes factoriels à retenir, où chaque composante constitue un critère de vulnérabilité. Pour atteindre cet objectif, les étapes suivantes ont été réalisées : la définition du domaine conceptuel qui consiste à identifier les dimensions et sélectionner les indicateurs ; normaliser les données afin de rendre chaque variable sans unité, i.e. soit en valeur centrée réduite; générer les items et purifier la matrice (calcul d'une matrice de similarité par corrélation) ; rechercher les vecteurs propres fournissant les principaux axes; et mise en évidence de la vulnérabilité par rapport aux critères identifiés à l'échelle spatiale du bassin de la Sirba.

a) Identification des dimensions de la vulnérabilité

Tel que mentionné dans chapitre I, la vulnérabilité est un concept multidimensionnel souvent mesuré à l'aide de séries chronologiques, basées sur un ensemble d'indicateurs quantifiables. Plusieurs chercheurs ont utilisé les indicateurs pour évaluer la vulnérabilité humaine et environnementale, face à divers risques et menaces (Mabbutt, 1986; Mouat *et al.*, 1997; Prince, 2002; Adger *et al.*, 2004). Comme il n'existe pas de consensus universellement reconnu pour la définition de ces termes, nous avons suivi les définitions ou la hiérarchisation des termes proposées dans l'étude de Brédif et Arnould (2005), afin de situer précisément notre étude dans le cadre des autres études de vulnérabilité. Un critère est un caractère, principe auquel on se réfère pour distinguer une chose d'une autre, pour porter un jugement,

une appréciation et se compose de deux éléments : le paramètre (ou objet d'évaluation), et le niveau d'exigence (point de référence, norme, règle ou niveau de compétences) à partir duquel le paramètre est évalué. Chaque critère est composé d'indicateurs, eux-mêmes composés de différents paramètres, parfois quantifiables, où l'indice peut alors être compris comme la valeur chiffrée d'un paramètre.

Les indicateurs sont des constructions quantifiables qui fournissent des informations mesurées réellement, sur une tendance de processus environnemental qui peut être observé à la surface de la Terre, et qui est sujet à des variations significatives (Hammond, *et al.*, 1995; 2003; Elliott, 1996; Neimanis et Kerr, 1996; Boulanger *et al.*, 2003). Quant au terme d'indice, il désigne un indicateur synthétique. Dans notre cas, les indicateurs ont été utilisés pour suivre l'évolution de la vulnérabilité des populations dans le temps et afin de comparer ses impacts dans plusieurs communautés du bassin (village et province). La construction des indicateurs a été réalisée en suivant le modèle conceptuel (cf. figure 2.8) appliqué aux indicateurs du développement durable (Berger, *et al.*, 1996 ; Boulanger, 2004).

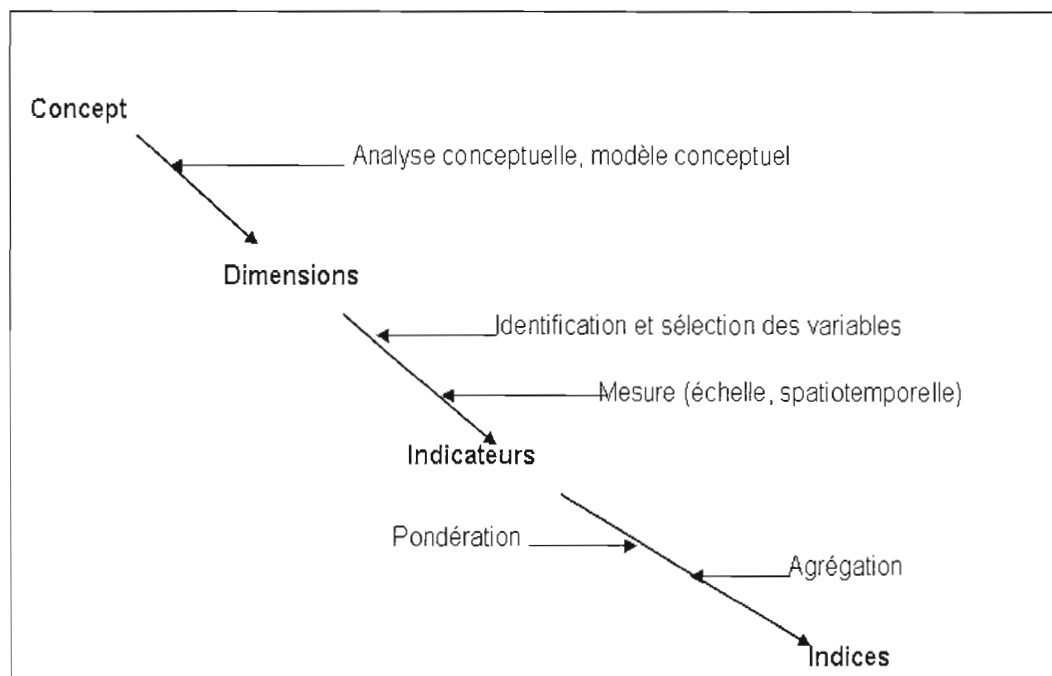


Figure 2.8 Construction des indicateurs et indices (Schéma adapté de Boulanger, 2004).

b) Sélection des indicateurs

Tel qu'illustré à la figure 2.8, les étapes, les étapes méthodologiques suivies consistent à identifier les différentes dimensions qui caractérisent le concept de vulnérabilité des populations. Étant donné que celui-ci est pluridimensionnel, nous avons identifié à travers le cadre théorique et la caractérisation de la zone d'étude plusieurs dimensions dont les plus importantes sont : les composantes climatiques, environnementales, économiques, sociodémographiques et la composante disponibilité de l'eau. Chaque composante a été décomposée en plusieurs variables parmi lesquelles certaines ont été retenues comme indicateurs. Ces derniers sont composés de paramètres mesurés au moyen d'observations en ce qui concerne les paramètres climatiques ou hydrologiques, ou calculés à partir des statistiques socio-économiques et démographiques.

Cette étape concerne la sélection d'un ensemble d'indicateurs. Ainsi, en rapport avec la définition de la vulnérabilité (rapport entre risque et capacité de réponse), nous avons privilégié les indicateurs qui sont en mesure de représenter l'ensemble des caractéristiques de la vulnérabilité des populations potentiellement identifiables via les informations disponibles suivantes.

- i.) Les indicateurs climatiques et hydrologiques : le climat représente en théorie le facteur de vulnérabilité des populations le plus important compte tenu du fait que la presque totalité de l'eau utilisée pour les besoins agricoles et domestiques des populations provient essentiellement des précipitations. Une infime partie est d'origine souterraine. Les indicateurs retenus pour quantifier et qualifier les facteurs climatiques sont les indices pluviométriques, les débits, et les volumes d'eau de surface et souterraines.
- ii.) Les indicateurs environnementaux : les risques environnementaux vis-à-vis des populations sont à considérer. Ceci signifie que les mesures de vulnérabilité doivent inclure des mesures des systèmes humains et naturels et des risques qui les affectent. six indicateurs ont été définis soit le NDVI, la qualité de l'eau, la quantité d'eau par hectare, la superficie des cultures pluviales, l'unité de culture et de bétail par hectare.
- iii.) Les indicateurs économiques : l'économie du bassin est caractérisée par les activités agropastorales. Les indicateurs retenus à cet effet sont entre autres la production agricole et animale par habitant et les revenus des cultures de rente.

- iv.) Les indicateurs sociodémographiques considérés sont la pauvreté, la couverture en soin de santé primaire, l'éducation des enfants de moins de 15 ans et l'alphabétisation des adultes, le taux d'accroissement des populations et les personnes à charge.
- v.) Les indicateurs socio-institutionnels considérés concernent la capacité dont disposent les individus à satisfaire leurs propres besoins en eau, et la capacité des autorités gouvernementales et des ONG à faire face aux impacts liés à la récurrence de la sécheresse dans la région. Les indicateurs ciblent les infrastructures hydrauliques pour la gestion et l'approvisionnement en eau potable des populations, tels que les forages et les puits modernes et les aménagements hydro-agricoles. Ces indicateurs semblent pertinents dans cette étude, considérant qu'ils sont directement et indirectement reliés aux ressources en eau sur le territoire de la Sirba. Le tableau 2.10 présente le récapitulatif des indicateurs retenus après caractérisation de la zone et les données de l'Annexe I. ont été utilisés pour développer les critères de vulnérabilité.

Tableau 2.10 Récapitulatif des facteurs et indicateurs de vulnérabilité identifiés après traitement et analyse de l'ensemble des données en 1984, 1994 et 2004.

Composantes	Indicateurs
Climat	Précipitations, jour humide, séquences sèches, intensité, maximum de précipitation en trois jours consécutifs, 90e centile de précipitation, nombre de jours de précipitation supérieure au 90e centile, fréquence de la sécheresse, Débits des cours d'eau et débits des forages, niveau statique recharge des forages, quantité d'eau par habitant déficit d'écoulement, quantité d'eau par habitant, utilisation de l'eau.
Environnement	Indice de végétation, unité de culture/hectare, unité de bétail /hectare cheptel, qualité de l'eau, pollution de l'eau, pollution des sols.
Économie	Superficie des cultures pluviales, superficie des cultures irriguées, production agricole, rendement des cultures, revenus agricole revenu d'élevage, taux de couverture des besoins céréaliers
Socio-institutionnelle	Population vivant sous le seuil de la pauvreté, taux de scolarité d'alphabétisation, santé pauvreté, Structure/population population rurale et active densité, personnes à charge, taux d'accroissement
Capacité institutionnelle	Nombre d'infrastructures, hydrauliques, proportion de la population ayant accès à l'eau potable Nombre de kilomètres de route par habitant

c) Standardisation et agrégation des indicateurs

Un indicateur est souvent exprimé sous différentes formes : quantitative et qualitative. Les indicateurs utilisés sont des données quantitatives, soit les paramètres climatiques ou les données dérivées à partir des indicateurs socio-économiques. À cet effet, les données des tableaux I.1 à I.5 (cf. Annexe I) constituent la base de notre analyse. Ces différents indicateurs ont été agrégés en indice synthétique comme suggéré par Boulanger (2004). Chacune des variables numériques a été normalisée, soit en ramenant les variables en une moyenne à "0" et sa variance à "1". La normalisation consiste à l'équation suivante :

$$V_{ij} = \frac{X_{ij} - moyXi}{\delta} \quad (11)$$

Où

X_{ij} est la la valeur de la variable pour chaque localité j

X_i est la moyenne spatiale de l'ensemble des valeurs X_{ij} sur la période 1984-2004.

δ est écart-type de la variable considérée et calculée sur l'ensemble des données.

L'agrégation est l'opération qui consiste à condenser l'information contenue dans chacun des critères en une seule information, c'est-à-dire ramener les différents indicateurs en un indice synthétique (Zaccaï, 2002), considéré comme significatif et les indicateurs de base n'ayant pas de sens individuellement. Ces indicateurs agrégés combinent des données ou des indicateurs de nature et de dimension différente (indicateurs composites). L'avantage est qu'un éventail de variables peut être incorporé, menant à un modèle plus représentatif d'une réalité complexe (Downing, 2005).

d) Génération des items et purification de la matrice

À l'issue des opérations de normalisation et d'agrégation des données, un échantillon de 35 indices (cf. Annexe I) a été retenu pour définir cinq grandes dimensions de la vulnérabilité des populations (climat, environnement, économie, sociodémographique et disponibilité en eau). La taille de cet échantillon étant importante, nous avons procédé à une première épuration en appliquant la corrélation non paramétrique de Spearman qui répond le mieux à ce type de donnée (i.e. permet de prendre en compte des corrélations non-linéaires). L'application de cette technique à nos données, consiste à mesurer le degré de relation

existant entre les indices. Pour épurer la matrice, nous avons appliqué un programme «Vulnerability-Analyst⁴» conçu sur la base de la corrélation de Spearman et qui permet de regrouper les indicateurs d'une même dimension qui sont significativement corrélés. Pour chacune des années (1984, 1994, 2004), l'exécution du programme consistait à réaliser un premier regroupement interne des indices significativement corrélés, et d'établir par la suite des liens entre les différents regroupements d'indices selon les étapes suivantes :

- i) Identifier les paires de variables significativement corrélées (corrélations non linéaires);
 - ii) Utiliser la paire qui est la plus corrélée en la combinant en un seul indice (moyenne des deux si positivement corrélée, ou différence des deux dans le cas d'une corrélation négative).
 - iii) Reproduire les étapes précédentes avec les nouveaux indices jusqu'à ce que les variables à l'intérieur d'une catégorie ne soient plus corrélées entre elles.
 - iv) Identifier les corrélations entre les variables de tous les groupes confondus, en traçant le graphique des dépendances et en interprétant la logique des dépendances.
- La matrice résultant de cette opération contient un nombre réduit d'items et les indices synthétiques ont été retenus afin de réaliser la seconde étape de l'analyse en composantes principales (cf. tableaux 5.2., 5.3 et 5.4 du chapitre V).

e) Validation des dimensions proposées

L'analyse multivariée réalisée sur les indices précédemment présentés, est réalisée à l'aide de l'analyse en composantes principales (ACP). Le but de cette analyse est de synthétiser les informations les plus pertinentes, tout en limitant le nombre d'informations perdues car redondantes et/ou faiblement liées aux fluctuations des autres variables. Les données étant issues d'une combinaison de paramètres physiques et socio-économiques, plus ou moins corrélés entre eux, la rotation oblique a été utilisée puisqu'elle est conceptuellement plus appropriée dans ce cas, et qu'elle autorise qu'il y ait corrélation entre les facteurs (O'Lenic et Livezey, 1988; Richman, 1986). La validation s'articule essentiellement sur :

- la fiabilité des données a été vérifiée en appliquant la règle de Kaiser (1958), selon laquelle les axes dont la valeur propre dépasse 1 sont retenus, Le KMO est une

⁴ Le Programme Vulnerability-Analyst a été élaboré avec la collaboration de Dr. Seidou associé de recherche à l'INRS (Eau-Terre-Environnement).

mesure générale de la corrélation partielle entre les variables de l'étude (Norusis, 1992). Il doit être le plus grand possible : moyen si > 0.7 ; inacceptable si < 0.5 pour qu'une analyse factorielle soit réalisable. Tandis que le test de sphéricité de Bartlett mesure la signification statistique des résultats à des seuils de 90 et 95% (i.e. 0.05 et 0.10). Ces tests indiquent l'adéquation des échantillons de données pour l'ACP.

- les contributions factorielles qui sont en deçà de 0,50 sont éliminés (cf. Blau *et al.*, 1993).
- les facteurs dont la communalité est inférieure à 0,5, sont jugés non significatifs, et sont soustraits de l'analyse (cf. Evrard *et al.*, 2003)

Plusieurs tentatives ont été réalisées afin d'obtenir un résultat satisfaisant en ce qui concerne la fiabilité du modèle, et la cohérence interne entre les items des axes factoriels. D'après une analyse exploratoire, la matrice de corrélation montre que plusieurs variables sont corrélées (cf. figure 5.1 du chapitre V). Les indices de KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) observés sont compris entre 0,5 à 0,7 à des seuils de 90 et 95%. Les indices qui présentent de fortes contributions (communalité) ont été utilisés pour la suite de l'analyse et ceux, dont la communalité est inférieure à 0,5 sont éliminés (cf. tableau 5.5 chapitre V) afin de réduire les erreurs aléatoires (Igalens et Roussel, 1998. Les tableaux 5.6, 5.7 et 5.8 du chapitre V présentent les matrices de corrélation pour les années 1984, 1994 et 2004.

2.2.4.2 Classification des critères

Afin de réaliser une analyse spatiale de la vulnérabilité, les contributions factorielles des observations aux trois axes ont été classifiées et agrégées à l'échelle de la province, selon les critères identifiés. La classification est une méthode de regroupement des individus selon leurs ressemblances. Le résultat est représenté sous la forme d'un arbre de classification qui relie un individu statistique à un autre, ou à un sous-groupe d'individus issus eux-mêmes de regroupements. Une classification ascendante hiérarchique a été appliquée sur les trois axes factoriels après rotation en utilisant la méthode de Ward (Von Storch et Zwiers, 2002), afin de classer les provinces selon leur degré de vulnérabilité présentant les mêmes caractéristiques, et distinguer les zones les plus vulnérables par rapport aux différents critères selon les années (1984, 1994 et 2004). Les contributions factorielles des provinces

(observation) ont servi à la classification hiérarchique (cf. tableau 2.18). Les résultats (cf. tableau 6.6) ont été spatialement analysés en utilisant un système d'information géographique (SIG).

2.2.4.3 Intégration des données dans le SIG

Un SIG a été utilisé pour superposer et cartographier la vulnérabilité des populations par rapport aux critères identifiés. La base de données ainsi élaborée, est constituée d'un ensemble de données référencées spatialement afin de dégager certaines tendances favorisant les mesures d'adaptation ou de prises de décisions plus éclairées, comme suggéré dans les objectifs de notre étude. Les contributions factorielles de chaque province ont été structurées en table de données relationnelles et une représentation spatiale des critères a été réalisée. Afin de représenter spatialement les critères, les cartes de vulnérabilité des populations du bassin de la Sirba ont été élaborées selon les étapes suivantes :

- Constitution d'une base de données des résultats de la classification des critères;
- Intégration des données pondérées sous forme de tables relationnelles dans le SIG;
- Réalisation cartographique à l'aide d'ARCGIS et de MapInfo (i.e.chapitre VI).

CHAPITRE III

RÉSULTATS : ANALYSE DES DONNÉES ENVIRONNEMENTALES

Ce chapitre présente l'analyse des résultats obtenus au moyen de la méthodologie présentée au chapitre 2. Il débute par la caractérisation du régime moyen des précipitations. Les effets de la variabilité de celles-ci sur les ressources en eau, l'évolution intra-saisonnière et interannuelle du couvert végétal en lien avec celle des précipitations sont examinés. Les changements observés dans l'occupation du sol, la pollution de l'eau et les maladies hydriques ont été abordés afin d'identifier et caractériser les principaux facteurs environnementaux de vulnérabilité des populations et d'autre part, de développer les critères de vulnérabilité.

3.1 Analyse du régime de précipitations moyen annuel

Cette section présente les résultats d'analyse de l'évolution du régime annuel moyen des précipitations et la distribution intra-saisonnière de celui-ci, ainsi que sa variabilité interannuelle et intra-saisonnière, la tendance des indices de précipitations sont analysées sur la période 1961-2004 sur l'ensemble du bassin, ainsi que l'effet de cette variabilité des pluies sur le régime d'écoulement des eaux de la Sirba

3.1.1 Le climat moyen

Le régime pluvial du bassin de la Sirba est marqué par une forte variabilité spatiale et temporelle. La saison humide apparaît généralement de mai à octobre, avec des pluies intenses et irrégulières suivies d'une saison sèche de novembre à avril, durant laquelle la presque totalité de nappes d'eau apparaissant durant la phase humide est évaporée. La quantité totale annuelle de pluie est faible, mal répartie dans l'espace, et elle décroît du Sud vers le Nord. Sur l'ensemble du bassin de la Sirba (cf. figure 3.1), celle-ci est de l'ordre de 587 mm/an (normale 1961-1990). Elle varie de 705 mm/an en moyenne au sud du bassin, à 556 mm/an au centre, et 484 mm/an dans la partie nord du bassin.

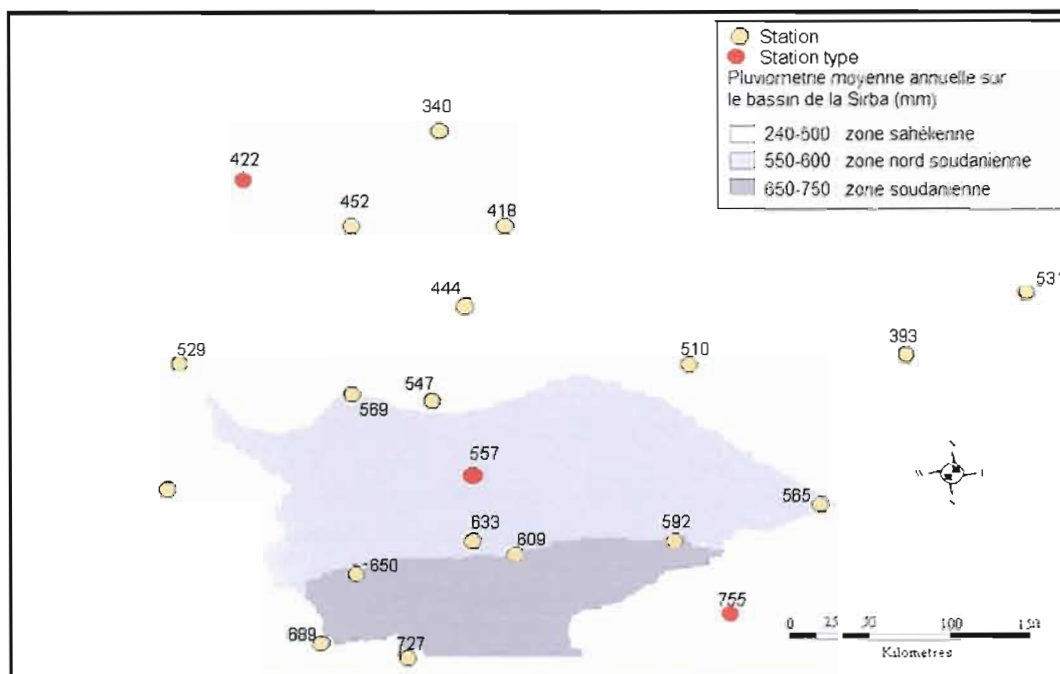


Figure 3.1 Zone climatique et pluviométrie moyenne annuelle (normale utilisée de 1961 1990) sur le bassin de la Sirba. (Source : Données originales de la Direction de la Météorologie du Burkina Faso, AGRHYMET).

Comme le montre la figure 3.1, les isohyètes moyens annuels divisent le bassin en trois sous-zones pluviométriques : la zone soudanienne, la zone nord-soudanienne et la zone sahélienne. La zone soudanienne bénéficie des pluies les plus abondantes, entre 650 à 755 mm par an. Elle comprend les stations de Fada N’Gourma Koupela, Zorgho, et Boulssa (cf. figure 2.6). Cette zone ne couvre que 20 % de la superficie du bassin.

Dans la partie nord soudanienne moins humide, le cumul annuel est de 584,5 mm en moyenne et varie de 550 à 649 mm/an en moyenne. Les stations de Piela, Bilanga, Bogandé, Gayeri, Tougouri et Say, sont comprises dans cette zone (cf. figure 2.6). Tandis que les régions situées au nord et à l’est du bassin dans la partie sahélienne soit, Dakiri, Barsalogho Aribinda, Dori, Sebba, Kollo et Tétra, enregistrent les valeurs plus faibles, de 450-350 mm/an. Ainsi, la différence relative entre la moyenne pluviométrique de la zone soudanienne et celle des zones nord soudanienne sahélienne est d’environ 14,5 %, et 38,8 % respectivement.

a) Normale climatique 1961-1990 et 1971-2000 sur l'ensemble du bassin

Le tableau 3.1 présente les normales climatiques calculées sur l'ensemble des stations de la Sirba pour deux périodes les périodes de 30 ans 1961-1990 et 1971-2000. Comme montré au tableau 3.1, les quantités moyennes annuelles de précipitation ont baissé pour la plupart des stations de la période 1961-1990 à la période 1971-2000.

Le déficit pluviométrique enregistré entre ces deux périodes est significatif, compris entre 5 % à 13 % suivant les stations. Les stations de Barsalogho, Aribinda Dori présentent les plus forts pourcentages de déficit pluviométriques avec 13 %, 10 % et 9 % respectivement. Dans la zone soudanienne, le tableau 3.1 indique que le cumul moyen annuel varie de 673 mm à la station de Zorgho à plus de 700 mm dans les stations de Fada N'Gourma, tandis qu'il est compris entre 300 mm à 600 mm dans la zone nord soudanienne et sahélienne. Ceci s'explique par l'affaiblissement de l'intensité de la mousson, au fur et à mesure que celle-ci s'avance vers le nord dans les régions soudano-sahéliennes.

Tableau 3.1 Moyenne annuelle de précipitations cumulées établie sur les périodes 1961-1990 et 1971-2000 pour l'ensemble des stations du bassin de la Sirba (Source : Direction de la Météorologie du Burkina Faso)

Zones climatiques	Stations	Moyenne annuelle (mm/an) 1961-1990	Moyenne annuelle (mm/an) 1971-2000	Déficit (%)
Zone soudanienne	Fada	755	725	-4
	Koupela	727	705	-3
	Zorgho	689	638	-7
	Boulssa	650	604	-7
Zone nord soudanien	Piela	633	590	-7
	Bilanga	609	630	3
	Gayeri	592	592	0
	Tougouri	569	554	-3
	Say	565	538	-5
	Bogandé	557	551	0
Zone Sahélienne	Dakiri	547	487	-11
	Barsalogho	529	485	-8
	Kollo	531	496	-7
	Sebba	510	464	-9
	Dori	452	411	-9
	Aribinda	422	399	-6
	Téra	393	372	-5

b) Variabilité interannuelle sur la période 1961-2004

Afin de mettre en évidence la variabilité interannuelle des pluies, les données des 17 stations pluviométriques ont été regroupées en trois zones pluviométriques sur la période 1961-2004 (cf. figure 3.1). Les anomalies standardisées par l'écart-type (section 2.2.3.2) donnent une indication sur les années déficitaires et excédentaires par rapport à la moyenne de référence 1961-1990.

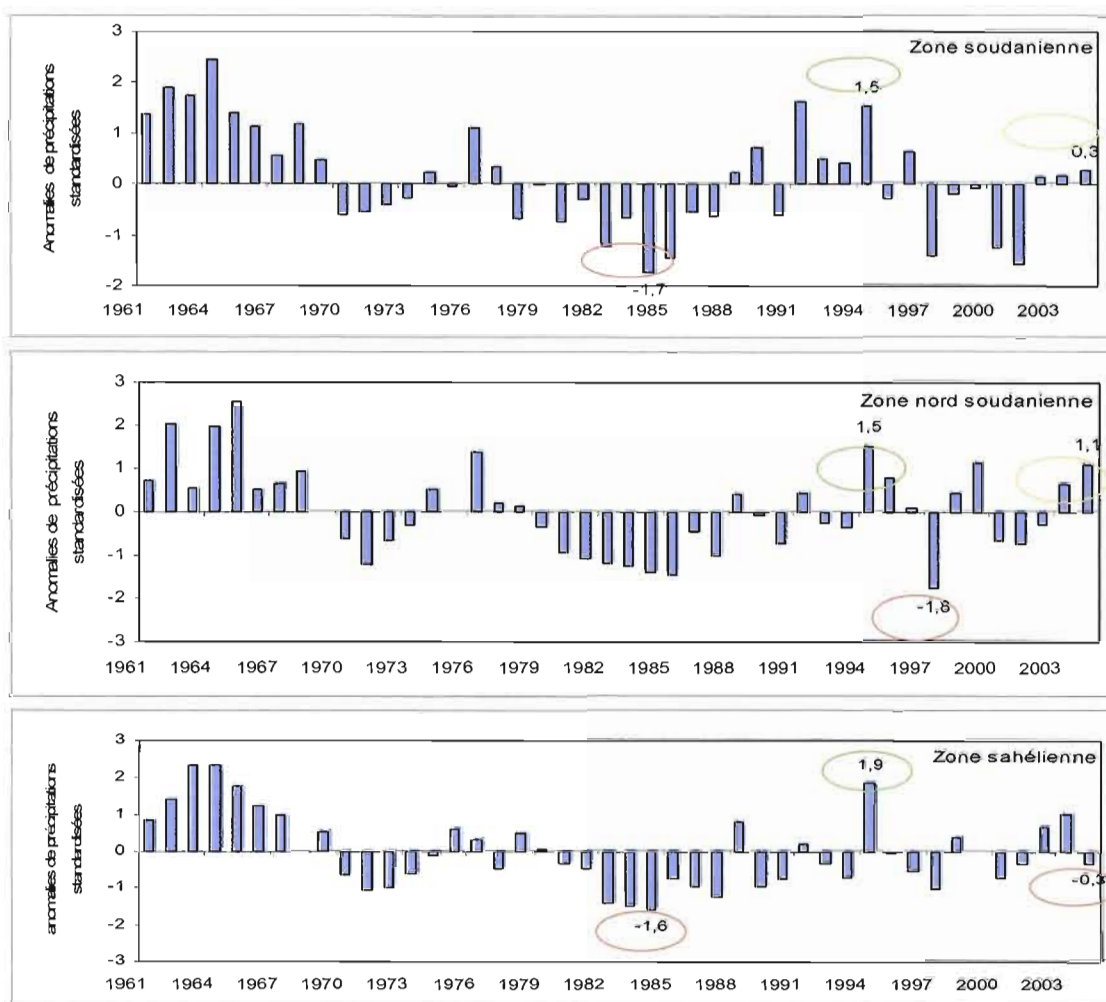


Figure 3.2 Évolution des anomalies standardisées (par l'écart-type), par rapport à la normale de 1961-1990, de la précipitation moyenne annuelle pour la période 1961-2004 dans la zone soudanienne (incluant les stations de Zorgho, Fada N'Gourma, Koupela et Boulssa), la zone nord soudanienne (incluant les stations de Bogandé, Gayeri, Piela, Bilanga, Tougouri et Say) et la zone sahélienne (incluant les stations de Barsalogho, Sebba, Aribinda, Kollo, Téra, Dakiri, Dori).

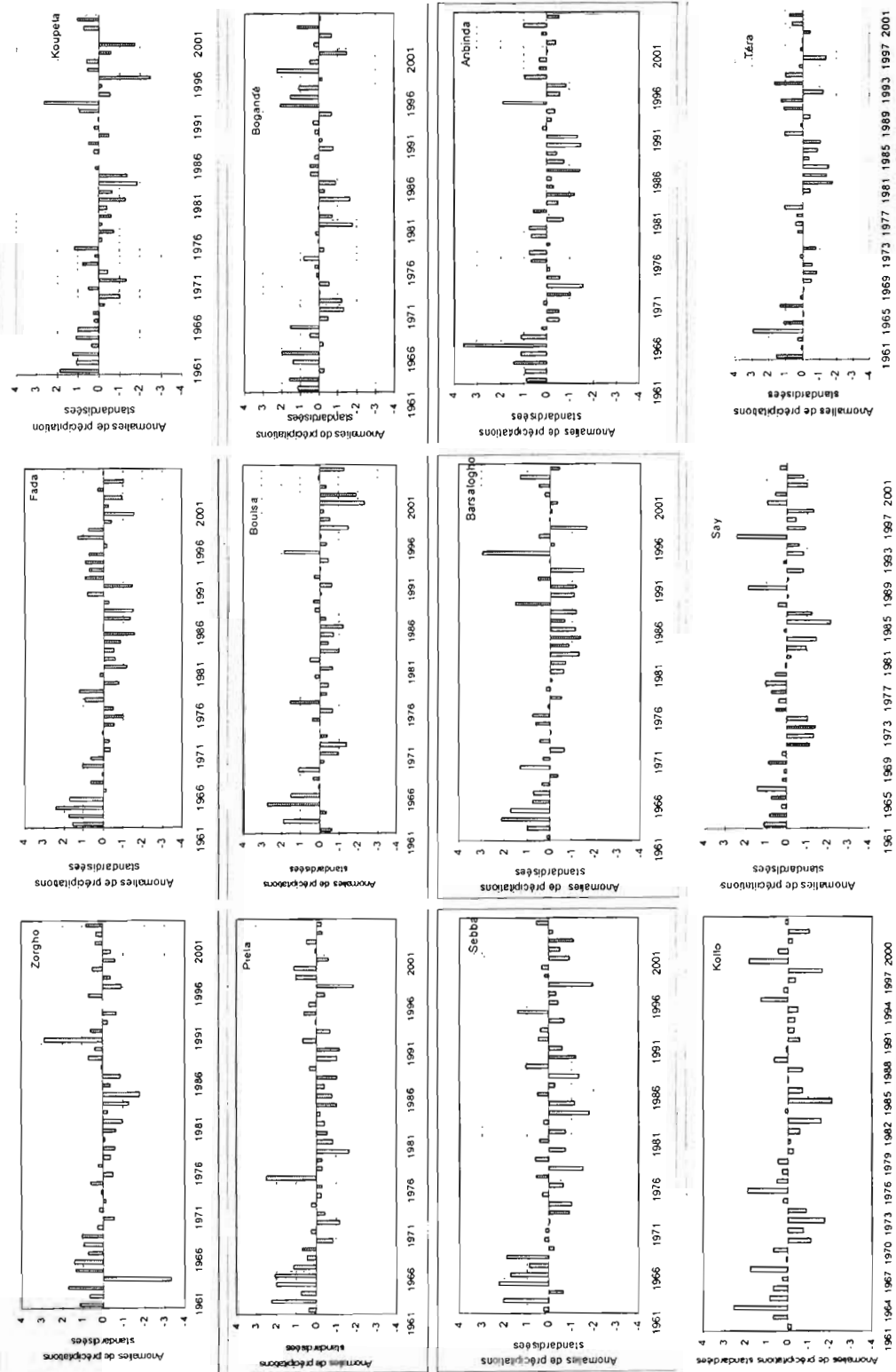


Figure 3.3 Idem qu'à la figure 3.2 mais pour les principales stations de Zorgho, Fada N'Gourma, Koupela, Boulsa, Bogandé, Piéla, Barsalogho, Say, Sebba, Arbinda, Kollo, Téra.

Les figures 3.2 et 3.3 illustrent l'évolution interannuelle des anomalies des moyennes annuelles de précipitations sur les trois régions climatiques ainsi que sur les principales stations du bassin pour l'ensemble de la période 1961 à 2004. L'analyse de ces anomalies a montré que le régime des précipitations moyennes annuelles a subi une modification durant la période 1961-2004. Une première diminution des précipitations a été constatée au cours des années 1970 à 1973, puis un retour aux valeurs normales durant les années 1974 à 1976, suivi d'une baisse sévère des valeurs des valeurs moyennes annuelles de précipitations au cours des années 1977 jusqu'à la fin des années 1980 et début 1990.

Comme montré sur les figures 3.2 et 3.3, ces variations suggèrent que la série pluviométrique se décompose en trois périodes de régime pluvial relativement distincts : 1961-1969, 1970-1989 et 1990-2004. Cette subdivision est considérée homogène sur le territoire de chacune des trois régions (soudanienne, nord soudanienne et sahélienne). Comme nous l'analyserons en détail dans la suite, les décennies 60, 70 et 80, 90 et le début des années 2000 marquent l'alternance de phase humide/sèche et près de la moyenne normale (par rapport à la normale climatique 1961-1990), respectivement (cf. figure 3.2 et 3.3).

Dans l'ensemble, la figure 3.2 montre que les trois zones pluviométriques sont marquées par une période humide de 1961 à 1969, au cours de laquelle la précipitation moyenne totale (PrTOT) était systématiquement au-dessus de la normale, suivie d'une succession d'années majoritairement déficitaires durant les années 1970 et 1980, soit une sécheresse quasi-ininterrompue jusqu'en 1989 et le début des années 1990, au cours de laquelle le cumul annuel de précipitation a baissé de 10 % à 20 % par rapport à la moyenne climatique normale (1961-1990) sur l'ensemble des trois régions.

La décennie 1980-1989 a été marquée par des sécheresses plus persistantes. Au cours de la période sèche 1970-1989, la zone soudanienne a enregistré un déficit pluviométrique de 7 % par rapport à la moyenne normale climatique et de 23 % par rapport à celle de la période humide. Dans la zone nord soudanienne, ce déficit est de 12 % et 21 % par rapport à ces deux périodes respectivement, alors que la zone sahélienne a connu une baisse de sa pluviométrie de 10 % et 30 %. Celle-ci a été marquée par la persistance des anomalies négatives,

prolongeant ainsi la sécheresse qui a débuté depuis le début des années 1970 jusqu'au début des années 1989.

La période plus récente de 1990 à 2004 se caractérise par une augmentation sensible de la moyenne annuelle de précipitation par rapport aux deux décennies précédentes. La figure 3.2 indique également que les valeurs des anomalies ont connu une légère augmentation au cours de la décennie 1990-2004 mais sans pour autant atteindre celle de la moyenne normale (1961-1990). Toutefois, elle est sujette à des variations dans sa distribution saisonnière (arrêt brusque des pluies en fin septembre) qui perturbent le calendrier agricole, réduisant les rendements et aggravant la vulnérabilité des populations.

Sur la période 1961-2004, trois années dont 1984, 1994 et 2004 ont retenu notre attention. Les cumuls moyens annuels de la pluviométrie calculés d'avril à octobre sur l'ensemble des stations (Cf. Annexe C) en 1984 sont les plus faibles de la série 1961-2004. Celle-ci correspond à la période la plus déficitaire de la décennie 1980. Tandis que l'année 1994 est la plus humide des années 1990 en termes de quantité pluviométrique après la grande sécheresse de la décennie 1980-1989. Comme démontré plus haut, les valeurs de cette année sur l'ensemble des stations du bassin sont supérieures à la normale 1961-1990. Alors que l'année 2004 marque une baisse des valeurs pluviométriques annuelles qui s'étaient stabilisées au tour de la moyenne normale au cours de la décennie 1990-1999. Cependant, la plupart des recherches récentes (Le Barbé *et al.*, 2002; Gachon *et al.*, 2007) indiquent que le déficit pluviométrique est plutôt lié à une diminution du nombre d'évènements pluvieux qu'à une diminution de la quantité de pluie par évènement.

3.1.2 Distribution mensuelle de précipitations (d'avril à octobre)

La saison des pluies se réalise en deux temps, soit la période pré-hivernale (avril-mai) et la période hivernale (juin-juillet-août-septembre) proprement dite. Les précipitations du mois d'avril sont très irrégulières et souvent peu fréquentes, ce mois pouvant le plus souvent être classé parmi les mois secs, si l'on se réfère au coefficient pluviométrique (Gaussen et Bagnouls, 1953) qui est inférieur à 1 pour 80 % des années d'observation et pour la majorité des stations. Les pluies deviennent plus fréquentes vers la mi-juin. Durant ce mois, les pluies sont le plus souvent intenses et de courte durée sur la majorité des stations du bassin. Elles sont

aussi très irrégulières, interrompues par une longue période (près d'une semaine) sans précipitation, ce qui conduit à la formation de sols encroûtés, favorables à de forts ruissellements lors des événements subséquents de pluie.

La saison des pluies débute lorsque le cumul de trois jours consécutif de pluie atteint 20 mm avec des séquences sèches inférieures à sept jours avec une précipitation inférieure à 5 mm (Diallo et Kaba, 1991; Marteau *et al.*, 2009). Cette quantité minimale est indispensable pour créer les conditions nécessaires à l'établissement de la culture (travaux du sol, germination, levée) et marquer ainsi le début de la saison de croissance. En effet, durant les mois de juillet, août et septembre, les pluies deviennent importantes et régulières pour se terminer en octobre. La fin de la saison est plus facile à déterminer car, durant cette période les pluies diminuent progressivement, avant leur disparition complète. Aussi, la variabilité est beaucoup plus forte au début qu'à la fin de la saison humide (Sultan *et al.*, 2004).

a) Normales climatiques 1961-1990 de la distribution des pluies mensuelles

Les données du tableau C.1, à C.17 de l'annexe C ont servi à l'analyse des contributions mensuelles de précipitation sur trois stations Fada, N'Gourma, Bogandé et Aribinda, représentant les trois régions climatiques présentées à la section 3.1 La figure 3.4 illustre la distribution intra-saisonnière des moyennes mensuelles de précipitations durant la saison de mousson, soit entre avril et octobre (valeurs normales calculées sur la période 1961-1990).

Comme montré sur la figure 3.4, la distribution du cumul mensuel des pluies est très variable au cours de la saison, les mois de juin, juillet, août et septembre recevant près de 85 % du total pluviométrique annuel. Le mois d'août reste le plus pluvieux avec un maximum atteignant 200 mm en moyenne dans la partie sud du bassin (Fada N'Gourma), environ de 161 mm dans la zone nord soudanienne (Bogandé) et de 145 mm dans la partie sahélienne (Aribinda). Les cumuls mensuels restent faibles durant les mois d'avril, mai et octobre soit, 8 mm, 14 mm et 19 mm de pluie en moyenne par région. La différence entre les cumuls mensuels de précipitations des stations pluvieuses du sud et celles plus sèches du nord peuvent atteindre 25% à 41%. La distribution saisonnière des pluies est très variable selon les années et les stations.

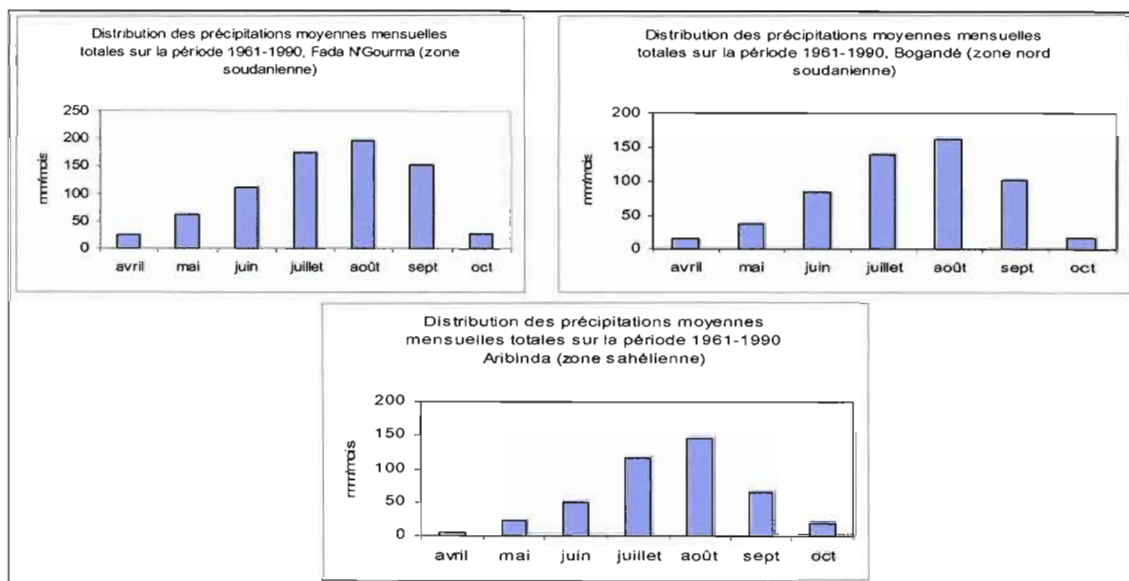


Figure 3.4 Distribution intra-saisonnière des précipitations moyennes mensuelles d'avril à octobre sur la période 1961-1990 des stations de Fada N'Gourma, Bogandé et Aribinda représentant les trois régions suggérées dans la figure 3.1.

b) Variabilité des contributions des précipitations mensuelles pour les années 1984, 1994 et 2004

Les figures 3.5, 3.6 et 3.7 présentent l'évolution intra-saisonnière des précipitations au cours des années 1984, 1994 et 2004. En comparant la distribution intra-saisonnière des précipitations en 1984, 1994 et 2004 qui sont respectivement des années sèche, pluvieuse et moyenne (par rapport à la normale 1961-1990), les figures 3.5, 3.6 et 3.7 affichent une irrégularité dans le régime de distribution des précipitations moyennes mensuelles. La figure 3.5 représentant la distribution intra-saisonnière en 1984 indique que les mois de juillet-août ont enregistré de faibles quantités de précipitations soit, 91mm et 65 mm pour la station de Fada N'Gourma, 77mm et 89 mm pour celle de Bogandé et 97 mm et 132 mm pour la station d'Aribinda, alors que les moyennes normales 1961-1990 sont : 174mm et 196 mm ; 139mm et 161 ; 116 mm et 145 mm (figure 3.5) respectivement. La durée de la saison diminue de la zone soudanienne vers la zone sahélienne. La station de Fada N'Gourma a enregistré six mois saison humide alors qu'elle n'est que de cinq et quatre mois dans les stations de Bogandé, et Aribinda.

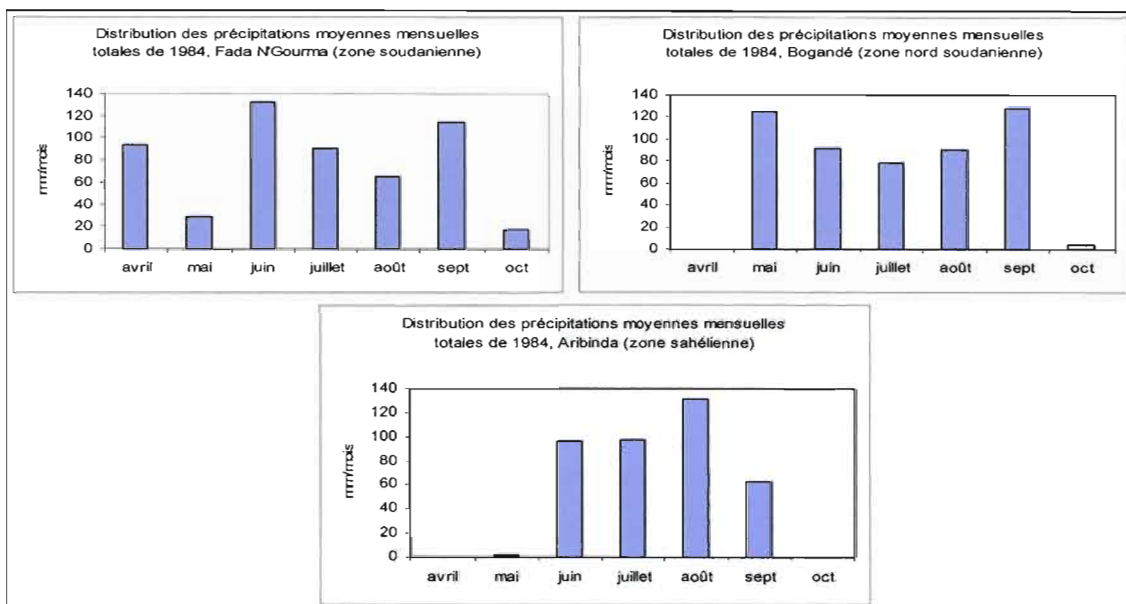


Figure 3.5 Distribution intra-saisonnière des précipitations moyennes mensuelles d'avril à octobre en 1984 des stations de Fada N'Gourma, Bogandé et Aribinda représentant les trois régions suggérées dans la figure 3.1.

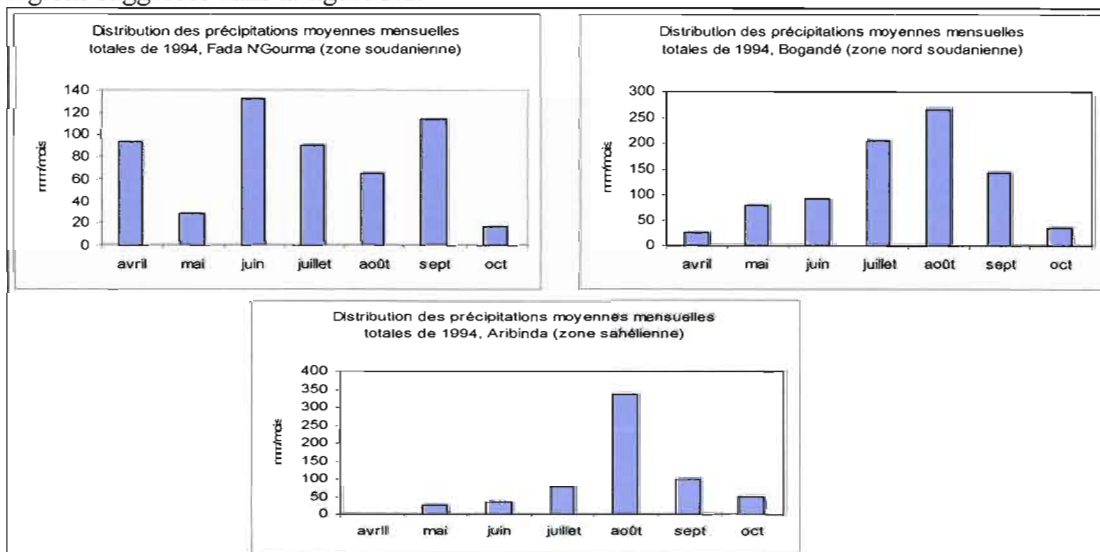


Figure 3.6 Idem qu'à la figure 3.5 mais pour l'année 1994

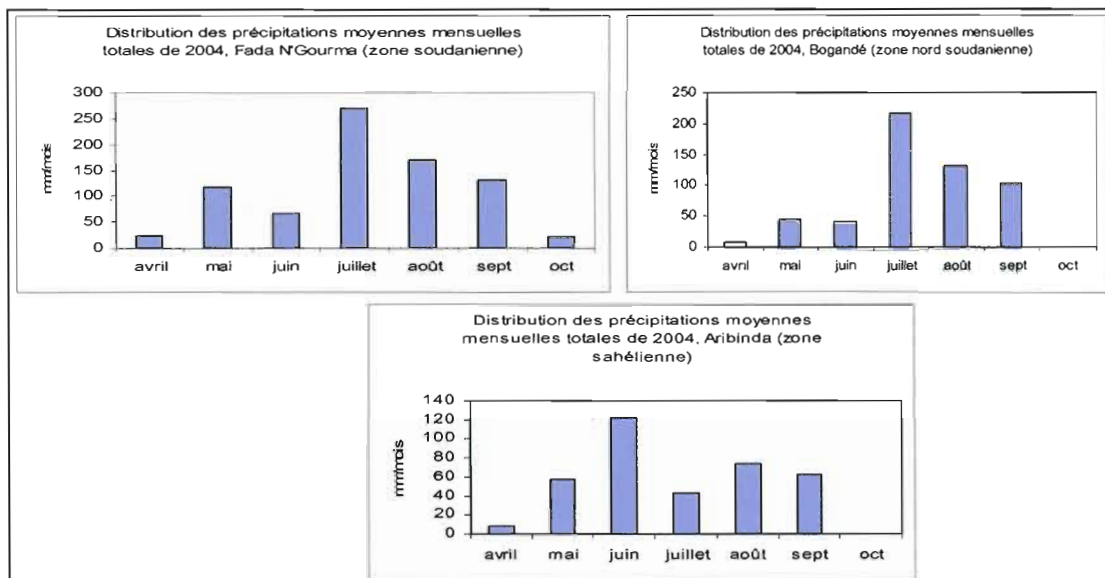


Figure 3.7 Idem qu'à la figure 3.5 mais pour l'année 2004.

Par contre, la figure 3.6 qui illustre l'évolution intra-saisonnière des précipitations en 1994, affiche une forte concentration des pluies sur les mois de juillet, août et septembre. Les quantités recueillies pour ces mois sont supérieures aux moyennes normales 1961-1990 (avec 204 mm, 266 mm et 141; 191mm, 293 mm et 155mm; 78 mm, 335 mm et 100 mm pour les trois stations de Fada N'Gourma, Bogandé et Aribinda. Le maximum du mois d'août est plus important dans les stations de Bogandé et Aribinda au détriment des mois de mai et octobre. Bien que cette année soit la plus pluvieuse de façon général, l'irrégularité dans la distribution des pluies au cours de la saison présente des risque de déficit hydrique pour les cultures en début de la saison humide et d'inondation vers le mois de septembre à cause de la forte concentration des pluies au mois d'août, en particulier dans les station de Bogandé et Aribinda où le mois d'août contribue à 46 % au cumul total mensuel.

La figure 3.7 montre que la distribution des cumuls moyens mensuels est très irrégulière en 2004. Les pluies sont concentrées sur les mois de juillet, août et septembre pour les stations de Fada N'Gourma et Bogandé. Tandis que la station d'Aribinda affiche les plus faibles valeurs des cumuls mensuels pour ces mêmes mois. Ces perturbations dans la distribution des précipitations en début d'hivernage ont des conséquences sur les semis. Cette mauvaise répartition des pluies au début de la phase végétative est en grande partie la cause de la perte de récoltes au cours de cette année.

Tableau 3.2 Contribution (%) des quantités moyennes mensuelles de précipitations au cumul moyen annuel des années 1984, 1994 et 2004 par rapport à la moyenne normale 1961-1990 pour les stations de Fada N’Gourma, Bogandé et Aribinda (Source : Données originales Direction de la Météorologie du Burkina Faso Centre AGHYMET).

<i>Mois</i>		<i>Avril</i>	<i>Mai</i>	<i>Juin</i>	<i>juillet</i>	<i>Août</i>	<i>sept</i>	<i>Oct</i>
Fada N’Gourma	1961-1990	3	8	15	23	26	20	4
	1984	17	5	24	17	12	21	3
	1994	3	9	11	24	32	17	4
	2004	3	15	8	33	20	15	2
Bogandé	1961-1990	3	7	15	25	29	18	3
	1984	0	24	18	15	17	25	1
	1994	0	3	10	24	37	19	8
	2004	1	8	7	40	24	19	0
Aribinda	1961-1990	1	5	12	28	34	15	4
	1984	0	1	25	25	34	16	0
	1994	0	5	6	12	53	16	8
	2004	2	16	33	12	20	17	0

D’après le tableau 3.2, les mois d’avril, mai et octobre, qui encadrent la période humide proprement dite, contribuent faiblement en moyenne (selon la normale de 1961-1990) au cumul annuel de précipitations avec seulement 3 % 8 % et 4 %, respectivement. Les mois de juin à septembre totalisent en moyenne 84 % du cumul annuel de précipitations. Le mois d’août contribue à lui seul en moyenne au tiers des précipitations totales annuelles (en moyenne normale 1961-1990), soit environ 26 % à Fada Gourma, 29 % à Bogandé et 34 % à Aribinda. Cependant, il existe une différence notable dans les contributions mensuelles de précipitation au cumul annuel selon les trois années concernées par rapport à la moyenne de ces contributions établie sur la période 1961-1990.

En 1984, les contributions mensuelles des mois de juillet- août a connu une forte baisse de 6 % ; 14 % et 10 et 12 % par rapport à la moyenne normale (1961-1990) pour les stations de Fada N’Gourma et Bogandé par rapport à la valeur normale. En 1994, les contributions ont augmenté sur les trois stations en particulier celle d’Aribinda où elles ont atteint 53 % du cumul annuel au mois d’août, tandis qu’en 2004, elles ont diminué au profit des mois de mai et juin (16 % et 33 %). En général, durant les phases sèches des décennies

80, les contributions sont celles de la période de juillet à août et les contributions des mois précédents et suivants le cœur de la période de mousson, sont devenues plus faibles, par rapport à la normale 1961-1990. La précipitation est ainsi mieux répartie durant les phases humides que durant les phases sèches, et ce sur l'ensemble de la période de mousson, au moins durant les mois de mai à septembre.

3.1.3 Caractéristiques des indices de précipitations

Les indices de précipitations soit la moyenne climatologique de ceux-ci sont analysés dans cette section sur la période 1961-1990 et leur variabilité interannuelle et intra-saisonnière sur l'ensemble de la période 1961-2004.

a) Normales climatiques 1961-1990

Le tableau 3.3 présente les normales climatiques des indices pluviométriques moyennées sur la période 1961-1990 d'avril à octobre pour chacune des 17 stations climatiques du bassin de la Sirba définies au tableau 2.4 du chapitre 2.

Tableau 3.3 Normales climatiques 1961-1990 des indices pluviométriques moyens mensuels entre avril et octobre pour l'ensemble des 17 stations du bassin.

Stations	Prepl (%/jour/mois)	SDII (mm/jour)	CDD jour/mois	Max3d mm/jour	Prcp90 mm/jour	Pwj>90p jour/mois
Zorgho	21	14	8	36	36	7
Koupela	23	14	7	38	40	7
Fada N'Gourma	26	13	8	38	36	7
Bilanga	19	15	9	36	25	6
Boulsa	22	13	8	35	41	6
Piela	20	15	9	35	37	6
Bogandé	19	13	9	31	28	6
Gayeri	21	13	8	31	34	6
Tougouri	18	16	12	29	31	7
Dakiri	18	14	10	30	31	6
Barsalogho	17	13	10	30	34	5
Sebba	17	14	11	31	32	6
Aribinda	16	12	13	24	28	5
Dori	16	12	11	27	32	4
Kollo	17	14	10	30	33	5
Say	16	15	10	31	31	6
Téra	14	12	11	24	29	4

D'après le tableau 3.3, la moyenne normale (1961-1990) du pourcentage moyen annuel de jours humides (Pr<pl) d'avril à octobre sur l'ensemble du bassin est de 18%. Ce pourcentage varie dans l'espace, il est relativement plus élevé au sud du bassin (entre 21% et 26 %) et diminue dans la partie nord soudanienne (entre 18 % et 20 %) et dans la zone sahélienne (entre 14 % et 16 %) en moyenne. De façon concomitante, le nombre de jours consécutifs secs (CDD) augmente du sud au nord du bassin. Il varie de 7 à 9 jours dans la zone soudanienne et atteint plus de 12 jours dans la partie sahélienne.

L'intensité moyenne (SDII) varie peu d'une station à une autre. Cependant, les plus fortes valeurs se retrouvent dans la zone soudanienne avec une moyenne journalière de 12 mm à 14 mm. La distribution spatiale du maximum de précipitation en trois jours consécutifs (Ma3d) varie de 24 à 36 mm en moyenne, les plus faibles valeurs sont enregistrées dans les stations de Dori et de Téra situées plus au nord. Le 90^e centile de précipitation varie de 40 mm/jour à Koupela à 24 mm/jour à Téra.

b) Variabilité interannuelle des indices pluviométriques sur la période 1961-2004

Les résultats du calcul des indices moyens mensuels présentés aux tableaux D.1 à D.17 (Cf. Annexe D) ont servi à l'analyse des indices pluviométriques calculés d'avril à octobre sur toute la période 1961-2004, sur l'ensemble des stations du bassin de la Sirba. Les figures 3.8 et 3.9 et 3.10 illustrent l'évolution interannuelle et décennale des indices pluviométriques sur cette même période dans les stations de Fada N'Gourma, Bogandé, et Aribinda, représentant les trois régions climatiques du bassin, tandis que les figures 3.11 à 3.14 représentent celle des principales stations du bassin selon les provinces.

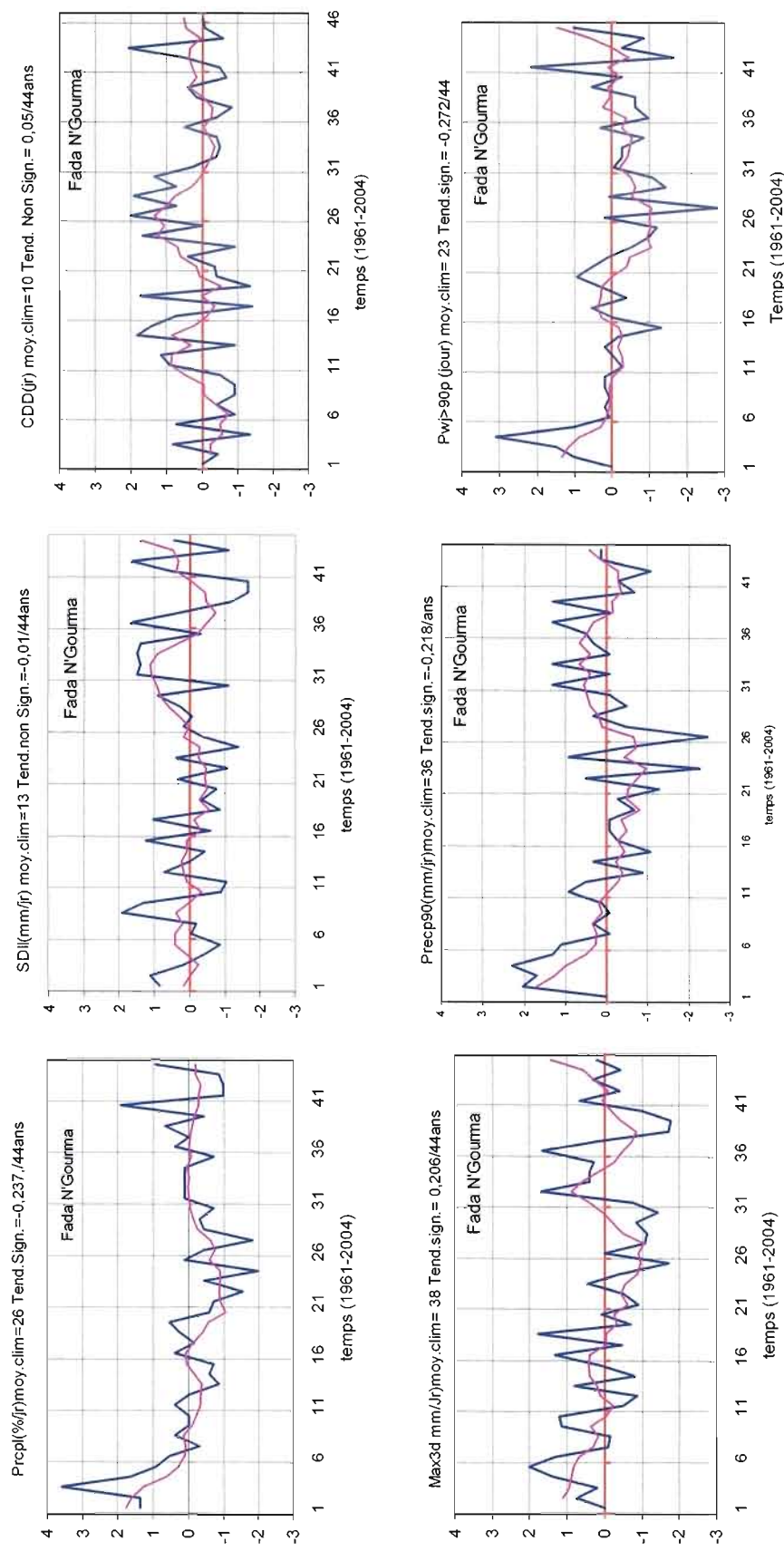


Figure 3.8 Anomalies interannuelles normalisées par l'écart-type pour chaque indice par rapport à la normale climatique 1961-1990 sur la station de Fada N'Gourma dans la zone soudanaise (cf. Figure 3.1). Les lignes en bleues représentent les anomalies interannuelles et les lignes roses la moyenne mobile sur 10 ans. En haut de chaque figure apparaît la moyenne climatique (1961-1990) et la valeur la pente de Sen (Tendance significative = Tend. Sign et non significative = non sig

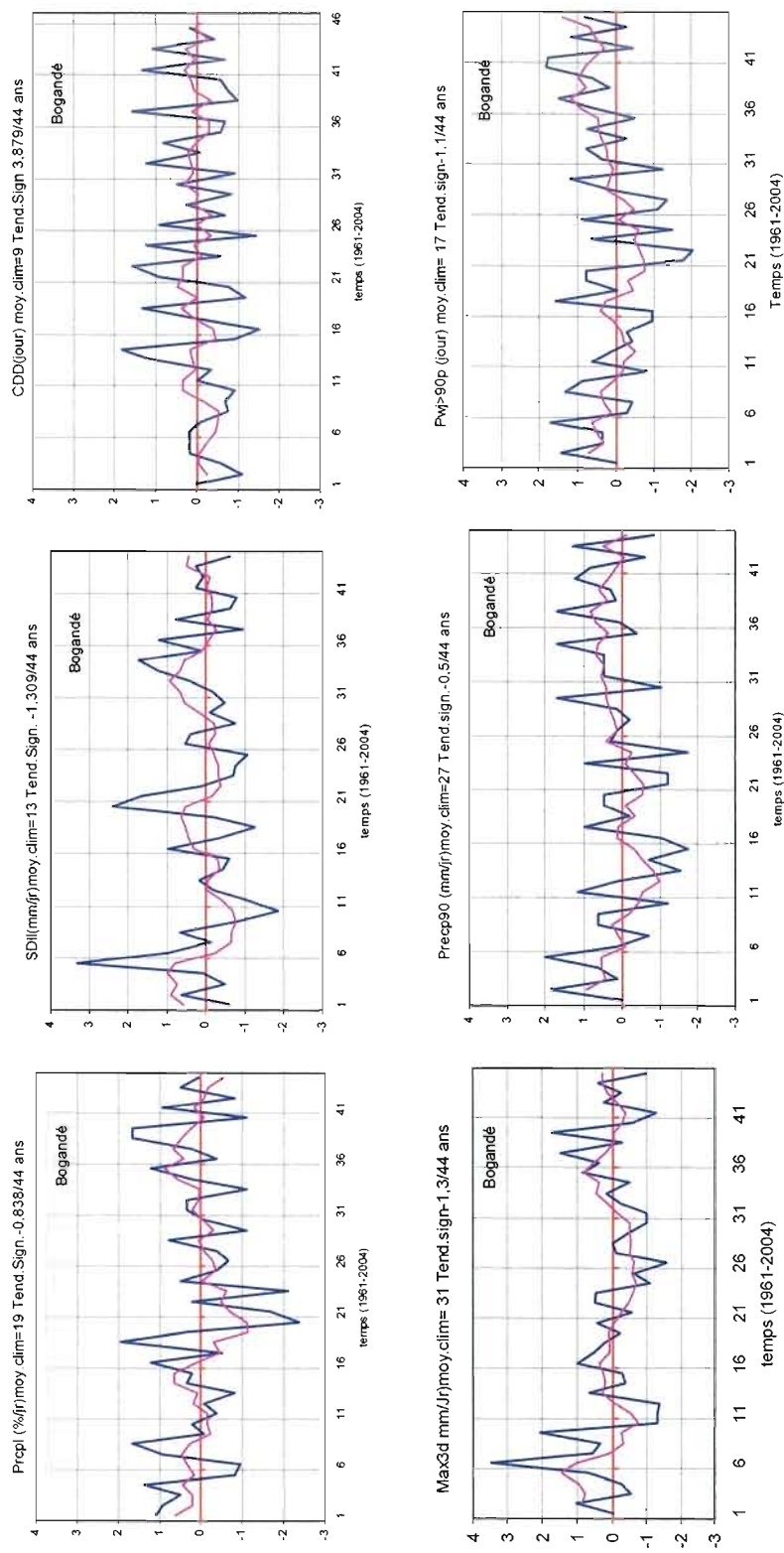


Figure 3.9 Idem à la figure 3.8 mais pour la station de Bogandé, zone nord soudanienne (cf. Figure 3.1)

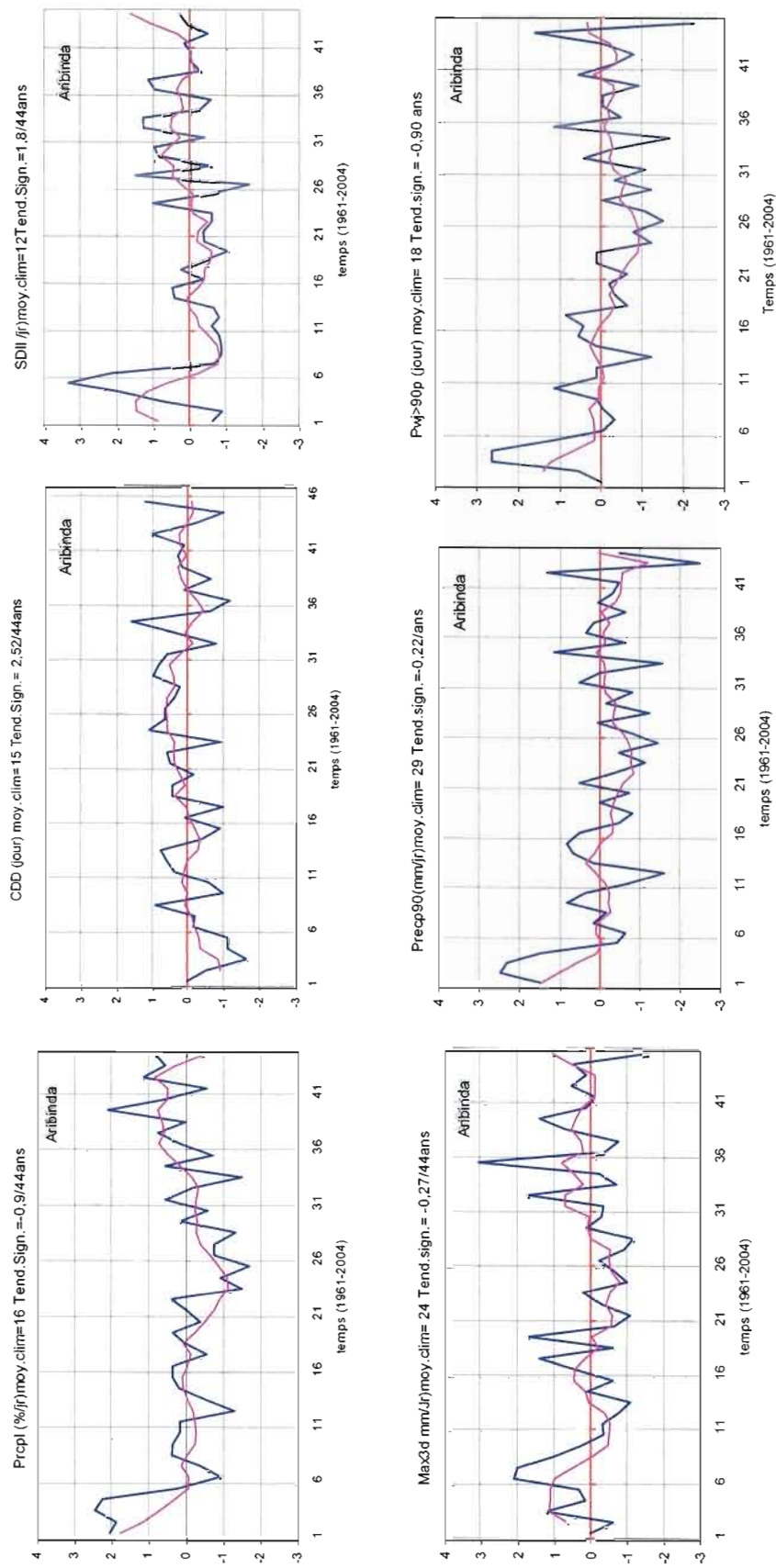


Figure 3.10 Idem à la figure 3.8 mais pour la station de Aribinda, zone sahélienne du bassin de la Sirba (cf. Figure 3.1).

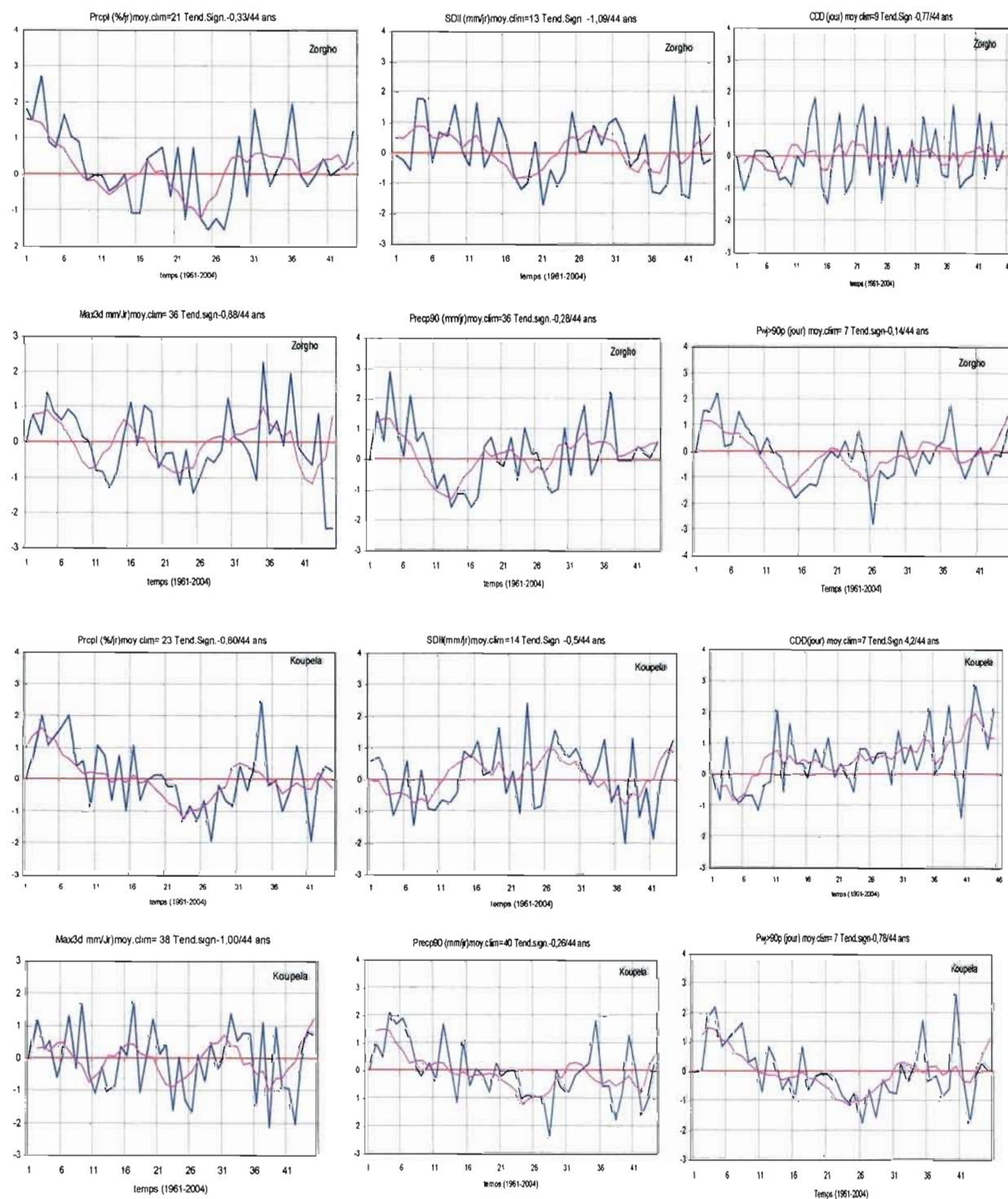


Figure 3.11 Idem à la figure 3.8 mais pour les stations de Zorgho et Koupela

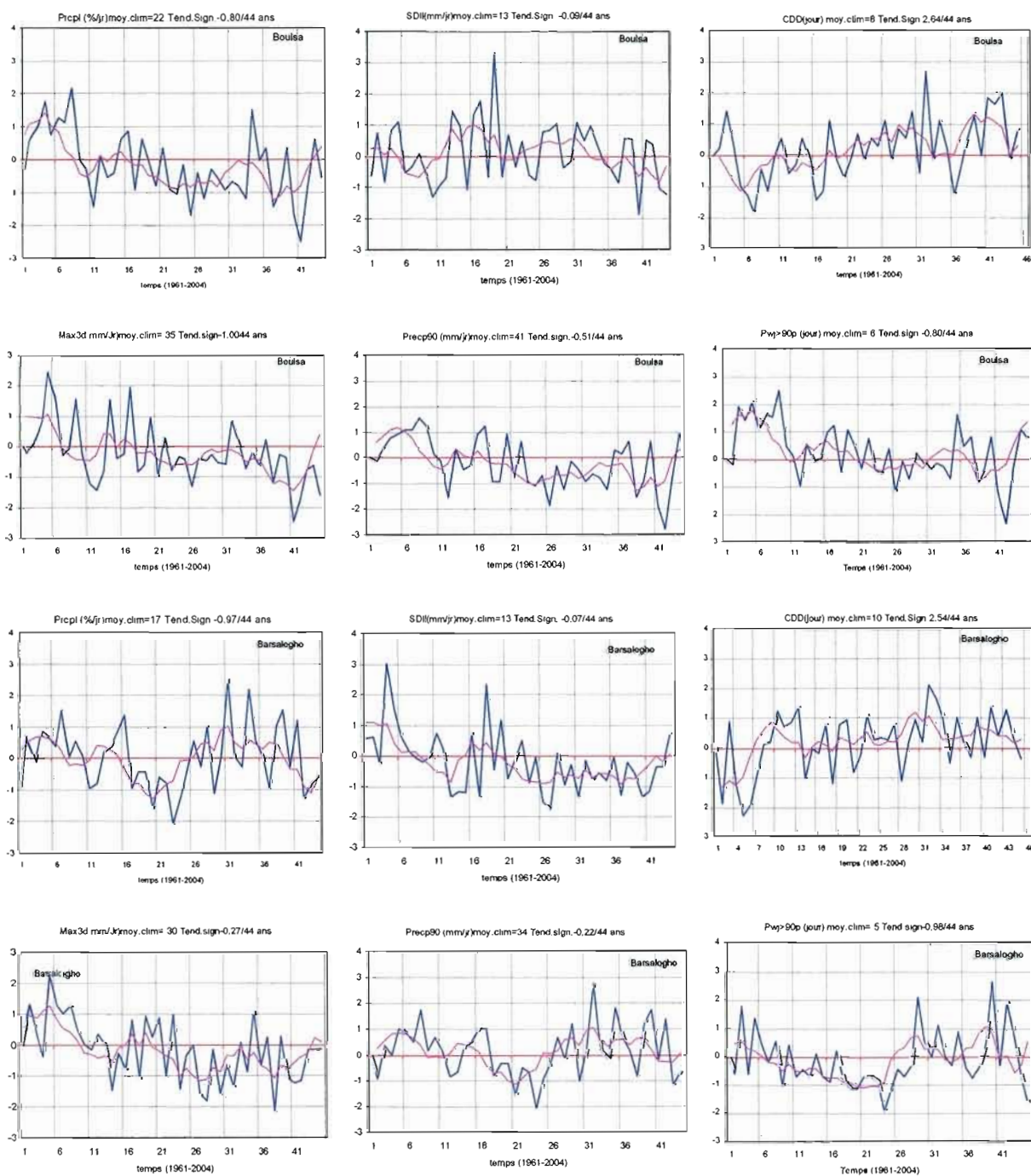


Figure 3.12 Idem à la figure 3.8 mais pour les stations de Boulsa et Barsalogho

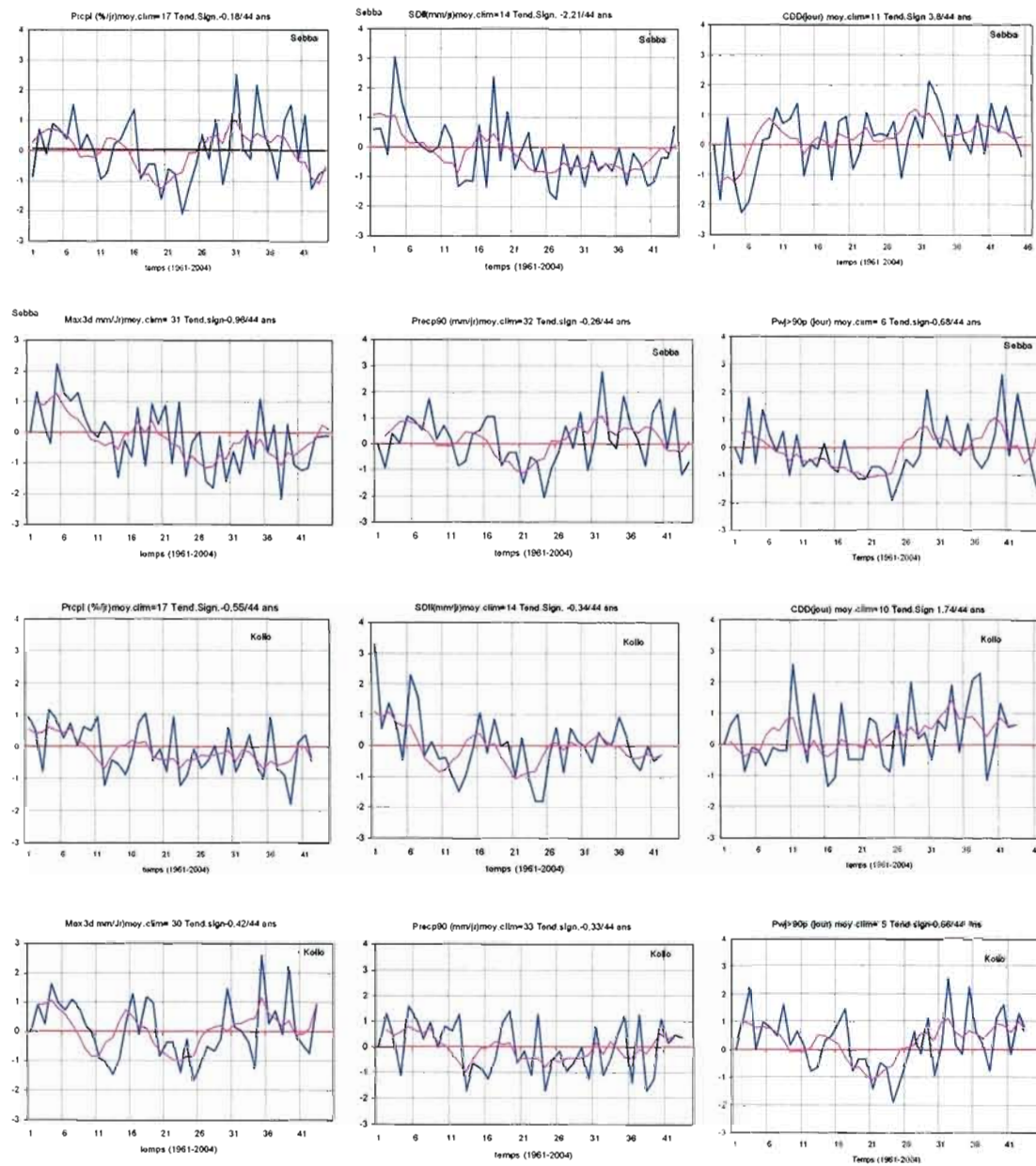


Figure 3.13 Idem à la figure 3.8 mais pour les stations de Sebba et Kollo.

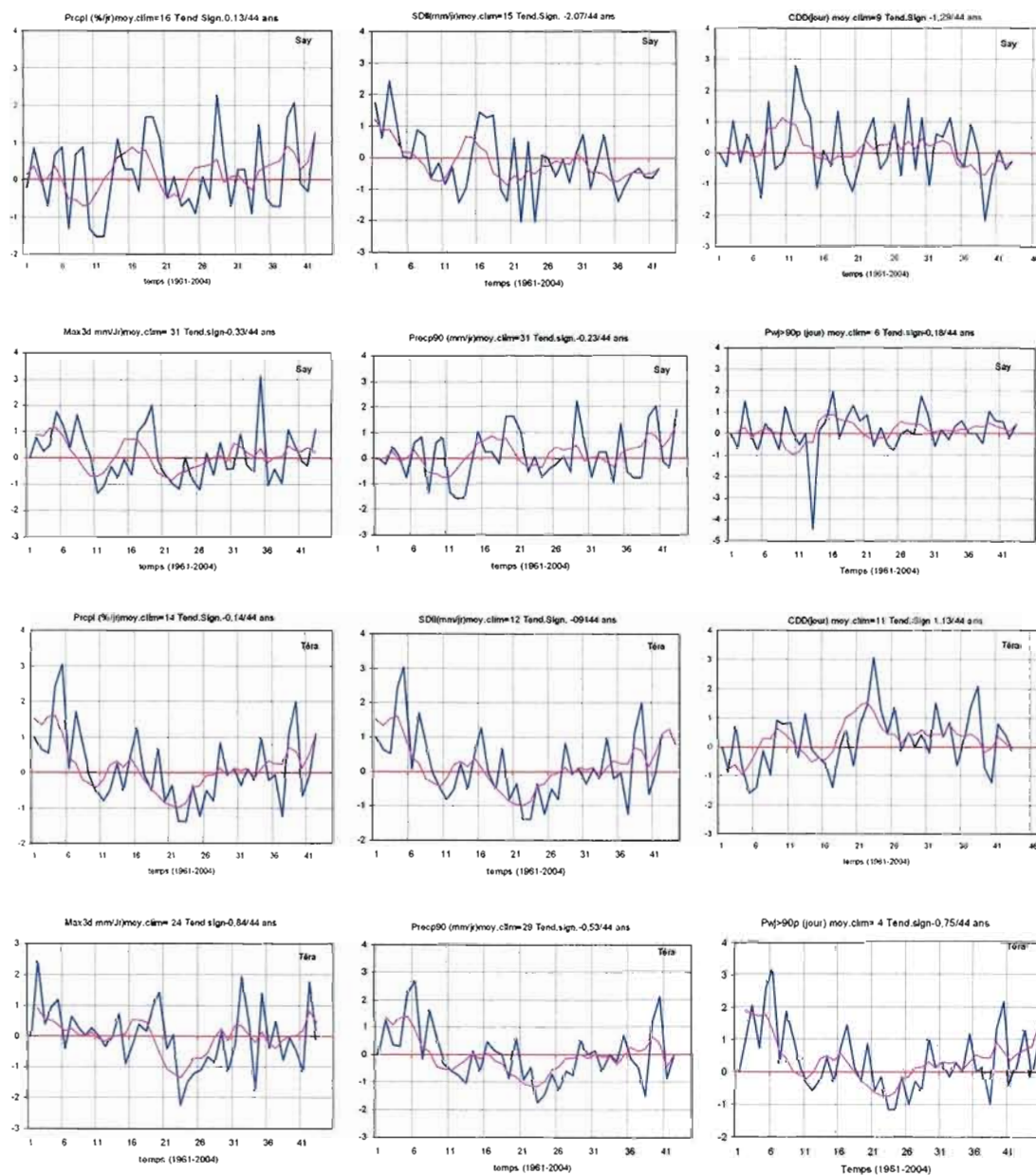


Figure 3.14 Idem à la figure 3.8 mais pour les stations de Say et Téra

i) Jours humides (Prépl) et maximum de jours consécutifs secs (CDD) : une hausse des anomalies du pourcentage de jour humide par rapport à la moyenne 1961-1990 est survenue au cours de la décennie 1961-1969, variant de 1,2, 0,6 et 1,2 dans les stations de Fada N’Gourma, Bogandé et Aribinda respectivement (cf. figures 3.8, 3.9 et 3.10). La

diminution des anomalies de jour humide intervenu au cours des années 1970 s'est prolongé au cours de la décennie 1980 avec des anomalies variant de 0,8 à Fada N'Gourma, 0,9 à Bogandé et 0,8 à Aribinda par rapport aux valeurs normales. C'est surtout au cours de la décennie 1980 que le déficit des événements pluvieux s'est accentué avec des valeurs variant de 1,2 0,7 et 1,4 respectivement (cf. figures 3.11, 3.12, 3.13, et 3.14). Les stations des régions nord soudaniennes et sahéliennes sont les plus touchées.

De manière concomitante avec l'évolution du pourcentage de jours humides, le maximum de jours consécutifs secs (CDD) fut inférieur par apport à la normale 1961-1990 durant la période des années soixante des anomalies avec des anomalies de -0,6, 0 et -0,3 et fut supérieur de 0,3, 0,6 et 0,7 durant les deux décennies suivante (cf. figures 3.7, 3.8 et 3.9). Durant cette même période, il reste au-dessus des valeurs normales de manière plus prononcée aux stations de la région soudaniennes et sahéliennes Bogandé et Aribinda, (cf. figures 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13 et 3.14).

ii) Intensité de précipitation (SDII) : les anomalies de l'intensité de précipitation moyenne par jour de pluie (SDII) sur la station de Fada N'Gourma et celles de l'ensemble des stations de la zone soudanienne du bassin n'ont pas connu de variations notables (cf. figure 3.7 et 3.10). Une augmentation de l'ordre de 1,3 1,8 et 0,8 lors des périodes humides (1961-1969) et de -1,2 -0,4 lors des périodes sèches (1970-1989) par rapport à la normale 1961-1990 dans les stations de Bogandé et Aribinda (cf. figure 3.8 et 3.9).

iii) Les extrêmes pluviométriques : les figures 3.8, 3.9 et 3.10 montrent également que, durant la période 1961-1969, le maximum de précipitation en trois jours consécutifs (Max3d) a subi une hausse avec des valeurs de 1,1 plus élevées que la normale pour les stations Fada, Bogandé et Aribinda (cf. figure 3.7, 3.8 et 3.9). Durant les trois dernières décennies suivantes, cet indice fut systématiquement inférieur à la normale. Le 90^e centile de précipitations (Pr₉₀) et le nombre de jours de précipitations supérieures au 90^e centile (P_{wj}>90) ont connu une hausse de 1,2 et 1,1 respectivement durant la période humide, et une diminution de -1,2 au cours de la période sèche de 1970 à 1989. Pour la période 1990-2004, des valeurs supérieures à la normale ont été enregistrées pour les stations de Fada N'Gourma

et Bogandé (cf. figures 3.7 et 3.8 et 3.9), alors que les valeurs ailleurs dans le bassin restent inférieures à la normale (cf. figures 3.11, 3.12, 3.14).

c) Variabilité intra-saisonnière des indices pluviométriques d'avril à octobre

Les figures 3.14 et 3.15 montrent l'évolution intra-saisonnière des indices de précipitations calculés sur la période normale 1961-1990 dans les stations de Fada N'Gourma, Bogandé et Aribinda. Dans l'ensemble, le pourcentage de jours humides augmente d'avril à août et diminue régulièrement de septembre à octobre. Il varie selon les trois régions pluviométriques (cf. figure 3.1).

Dans la zone soudanienne, le maximum de jours consécutifs secs quant à lui, diminue entre les mois de juillet et septembre, période au cours de laquelle les précipitations sont plus fréquentes sur le bassin. Tel que présenté sur les figures 3.15 et 3.16, les mois de mai, juin et septembre connaissent des valeurs plus faibles à cause de la fréquence des pluies durant cette période. Les valeurs du maximum de précipitations en trois jours consécutifs évoluent progressivement d'avril à octobre avec un maximum en août. Tandis que l'intensité de précipitations varie peu au cours de l'année avec des valeurs qui varient entre 10 mm et 14 mm par jour de précipitations en moyenne et qui peuvent atteindre 16 mm en août. Le 90^e centile de précipitation suit également la même allure d'évolution intra-saisonnière avec un maximum en juillet et août, tandis que la fréquence des précipitations supérieure au 90^e centile est plus élevée durant les mois de juillet à septembre.

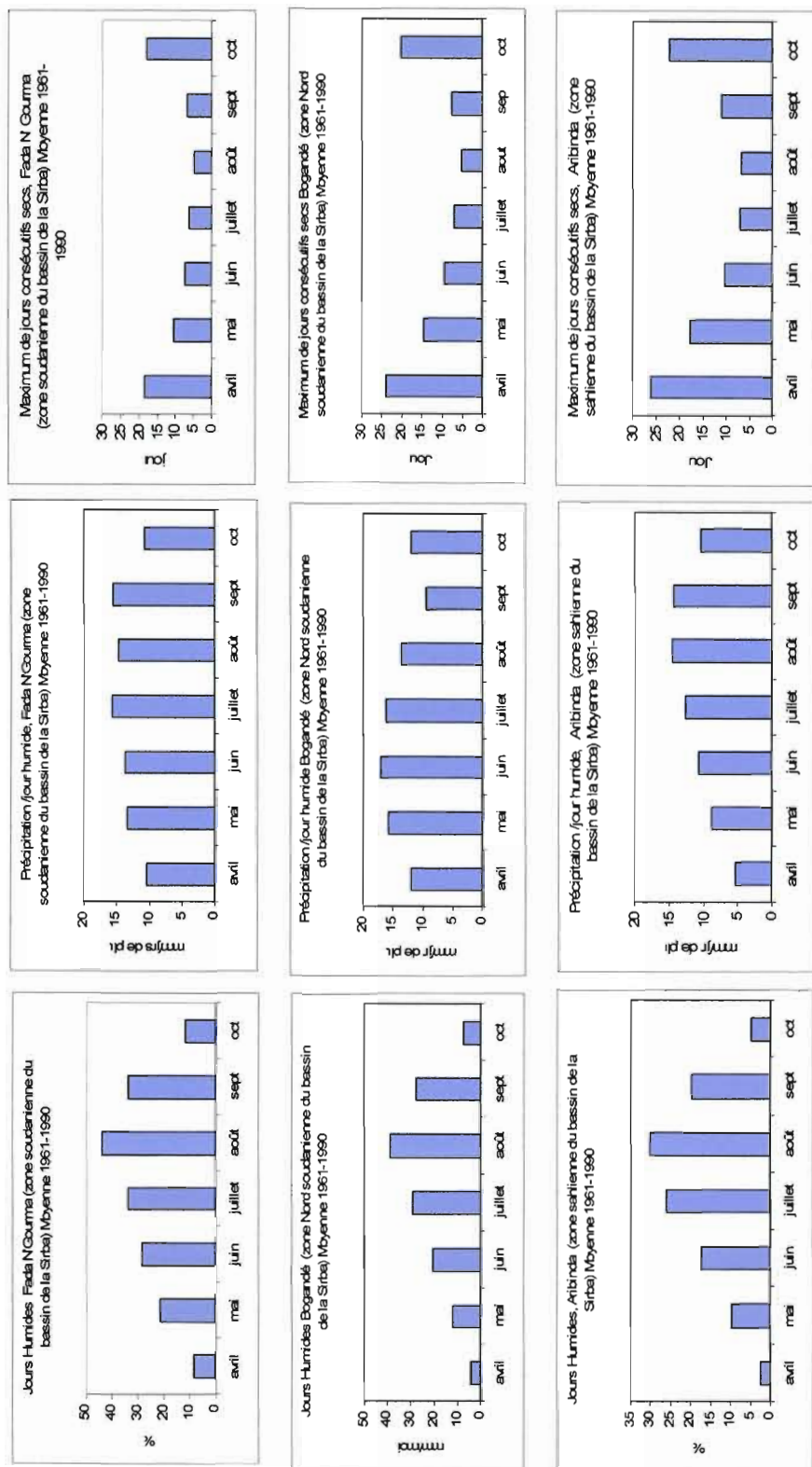


Figure 3.15 Histogrammes mensuels du cumul total de précipitations (mm/jour), de l'écart-type mensuel (mm/jour), de la fréquence de jours humides, et du maximum de jours consécutifs secs (jour) pour les stations de Fada N'Gourma, Bogandé et Aribinda. La moyenne climatologique des indices est calculée pour la période 1961-1990.

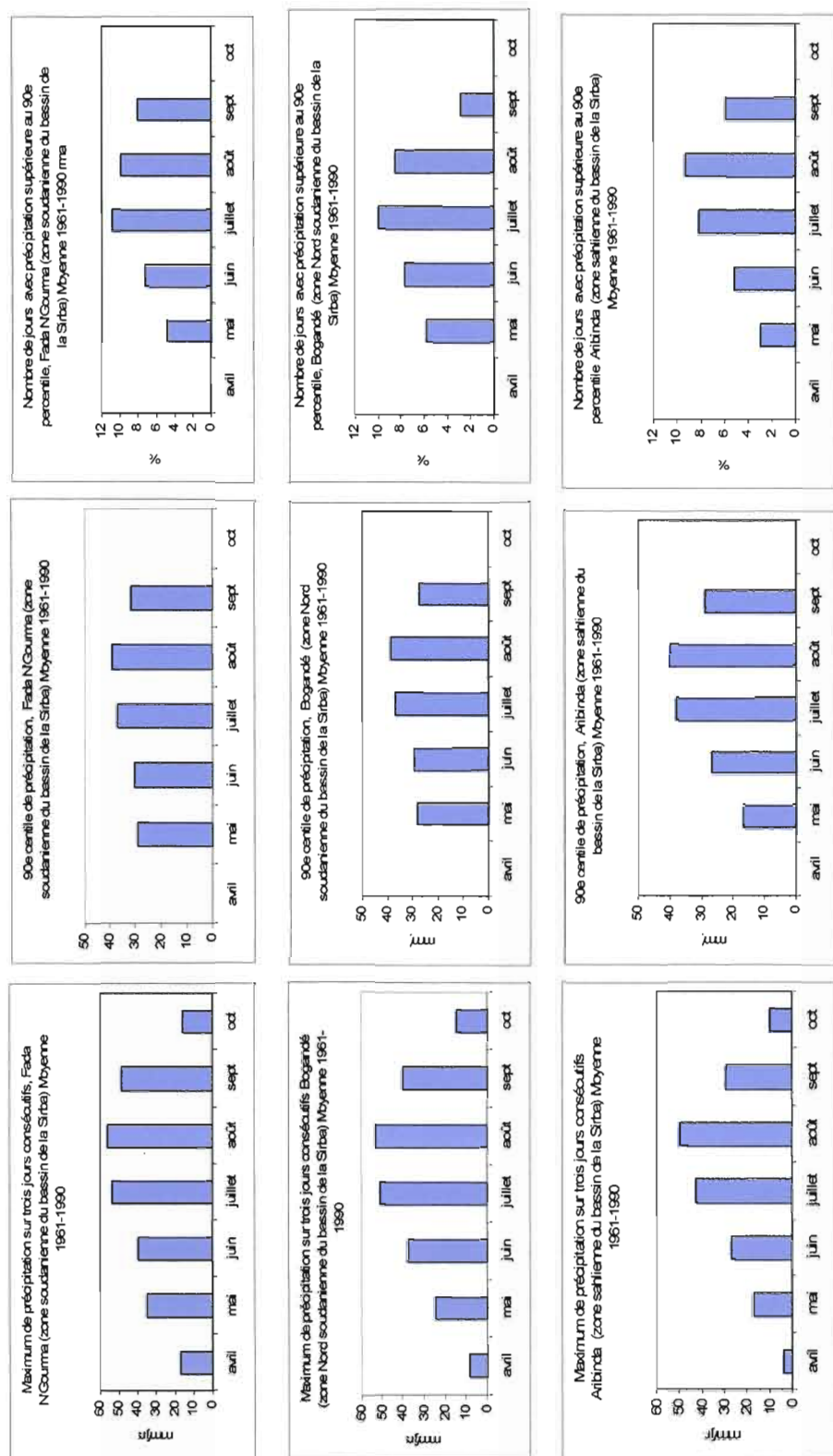


Figure 3.16 Idem à la figure 3.8 mais pour l'intensité de précipitations par jour, le 90^e centile de précipitation le maximum de précipitations en trois jours consécutifs et le maximum de jours de précipitations supérieur au 90^e centile.

3.1.4 Tendence du régime de précipitations sur l'ensemble du bassin de la Sirba

Les tendances calculées durant la période 1961-2004 et analysées dans cette section concernent les cumuls annuels de précipitations et les indices pluviométriques moyens saisonniers calculés sur la période d'avril à octobre, et ce pour l'ensemble des stations du bassin de la Sirba. Le tableau 3.4 présente les valeurs du taux de Kendall, tandis que le tableau 3.5 contient celles de la pente de Sen pour chaque station.

Tableau 3.4 Tendence statistiquement significative des indices pluviométriques selon les 17 stations du bassin de la Sirba au seuil de 99 et 95 % (taux de Kendall, $H \neq 0$) calculée sur la période la période 1961-2004.

Stations	Prcpl	SDII	CDD	MAX3D	Pecp90	Pwj>90	PrcpTOT
Zorgho	-0,145	-0,148	-0,083	-,313(**)	-0,001	-0,128	-,252(*)
P- value	0,174	0,157	0,435	0,003	0,992	0,224	0,016
Fada	-,248(*)	0,007	0,045	-0,206	-0,094	-0,145	-0,198
P- value	0,02	0,951	0,687	0,053	0,381	0,171	0,06
Koupela	-,264(*)	0,085	-,457(**)	-0,066	-,316(**)	-,241(*)	-0,136
P- value	0,013	0,418	0,000	0,531	0,003	0,023	0,192
Boulssa	-,358(**)	-0,063	-,345(**)	-,325(**)	-,341(**)	-,324(**)	-,224(*)
P- value	0,001	0,544	0,001	0,002	0,001	0,002	0,032
Bogandé	-0,049	0,038	0,067	-0,116	0,095	-0,179	0,045
P- value	0,648	0,729	0,545	0,274	0,372	0,089	0,671
Piela	-0,149	-0,123	0,058	-,268(*)	-0,165	-0,161	-0,169
P- value	0,162	0,241	0,584	0,01	0,119	0,128	0,106
Bilanga	0,105	0,068	-0,032	-0,141	0,023	0,119	0,164
P- value	0,366	0,556	0,783	0,219	0,844	0,301	0,154
Gayeri	-,320(**)	0,006	-,389(**)	-0,045	-,246(*)	-,275(*)	-0,049
P- value	0,01	0,963	0,002	0,71	0,045	0,025	0,687
Tougouri	-,227(*)	0,196	0,152	-0,007	-,290(**)	-0,103	-,242(*)
P- value	0,042	0,08	0,178	0,946	0,009	0,379	0,026
Dakiri	-,357(**)	0,094	-,356(**)	-0,134	-,361(**)	-,248(*)	-,220(*)
P- value	0,001	0,374	0,001	0,205	0,001	0,02	0,037
Aribinda	-,260(*)	0,191	0,191	-0,039	0	-,285(**)	-0,152
P- value	0,014	0,07	0,082	0,708	1	0,007	0,148
Barsalogho	-,264(*)	-0,03	-,313(**)	-0,188	-,331(**)	-,345(**)	-,275(**)
P- value	0,013	0,777	0,003	0,072	0,002	0,001	0,009
Sebba	-0,062	-,288(**)	-,293(**)	-,334(**)	-0,062	0,06	-,209(*)
P- value	0,557	0,006	0,005	0,001	0,557	0,57	0,045
Kollo	-,245(*)	-0,107	-,229(*)	-0,106	-0,133	-0,024	-0,178
P- value	0,025	0,319	0,034	0,324	0,22	0,828	0,097
Téra	-0,113	-0,078	0,182	-0,175	-0,099	-0,113	-0,075
P- value	0,302	0,468	0,093	0,102	0,362	0,302	0,481
Dori	-0,186	0,058	0,205	-0,125	-0,189	-0,191	-0,165
P- value	0,082	0,578	0,052	0,233	0,077	0,074	0,115
Say	0,043	-,249(*)	-0,029	-0,08	0,046	0,102	-0,182
P- value	0,695	0,02	0,786	0,455	0,672	0,35	0,089

Tableau 3.5 Tendances statistiquement significative des indices pluviométriques selon les 17 stations du bassin de la Sirba au seuil de 95 % (Pente de Sen \neq 0) sur la période 1961-2004.

Stations	Prcpt	SDII	CDD	MAX3D	Pecp90	Pwj>90	PrcptTOT
Zorgho	-0,690	-1,057	-1,038	-0,869	-0,003	-1,829	-0,257
Fada	0,174	0,157	0,435	0,003	0,992	0,224	0,016
	-0,947	0,054	0,492	-0,542	-0,258	-2,071	-0,185
Koupela	0,020	0,951	0,687	0,053	0,381	0,171	0,060
	-1,155	0,590	6,013	-0,171	-0,786	-3,570	-0,129
Boulsa	0,013	0,418	0,000	0,531	0,003	0,023	0,192
	-1,709	-0,489	4,313	-1,019	-0,868	-5,195	-0,264
Bogandé	0,001	0,544	0,001	0,002	0,001	0,002	0,032
	-0,256	0,282	0,729	-0,366	0,328	-2,898	0,054
Piela	0,648	0,729	0,545	0,274	0,372	0,089	0,671
	-0,763	-0,872	0,674	-0,798	-0,462	-2,927	-0,199
Bilanga	0,162	0,241	0,584	0,010	0,119	0,128	0,106
	0,538	0,489	-0,364	-0,395	0,088	2,063	0,172
Gayeri	0,366	0,556	0,783	0,219	0,844	0,301	0,154
	-1,723	0,047	4,420	-0,148	-0,727	-4,599	-0,056
Tougouri	0,010	0,963	0,002	0,710	0,045	0,025	0,687
	-1,335	1,400	1,382	-0,025	-1,036	-1,717	-0,304
Dakiri	0,042	0,080	0,178	0,946	0,009	0,379	0,026
	-2,272	0,650	3,358	-0,452	-1,312	-4,133	-0,286
Aribinda	0,001	0,374	0,001	0,205	0,001	0,020	0,037
	-1,676	1,559	1,303	-0,154	0,000	-6,283	-0,274
Barsalogho	0,014	0,070	0,082	0,708	1,000	0,007	0,148
	-1,584	-0,227	3,074	-0,688	-1,004	-6,515	-0,367
Sebba	0,013	0,777	0,003	0,072	0,002	0,001	0,009
	-0,362	-2,174	2,529	-1,114	-0,188	1,074	-0,288
Kollo	0,557	0,006	0,005	0,001	0,557	0,570	0,045
	-1,513	-0,773	2,290	-0,359	-0,403	-0,467	-0,233
Téra	0,025	0,319	0,034	0,324	0,220	0,828	0,097
	-0,818	-0,658	1,569	-0,738	-0,352	-2,728	-0,131
Dori	0,302	0,468	0,093	0,102	0,362	0,302	0,481
	-1,184	0,501	1,971	-0,498	-0,596	-2,388	-0,283
Say	0,082	0,578	0,052	0,233	0,077	0,074	0,115
	0,266	-1,756	-0,300	-0,265	0,148	1,645	-0,219
	0,695	0,020	0,786	0,455	0,672	0,350	0,089

D'après le tableau 3.4 pour chaque station correspond les valeurs des taux de Kendall et le p-value qui est inférieur à 0.005 pour des valeurs significatives du taux de Kendall. La pente de Sen (cf. tableau 3.5) a été calculée à partir des données du tableau 3.4 et permet de mieux apprécier la tendance des indices pluviométriques (cf. figure 3.17).

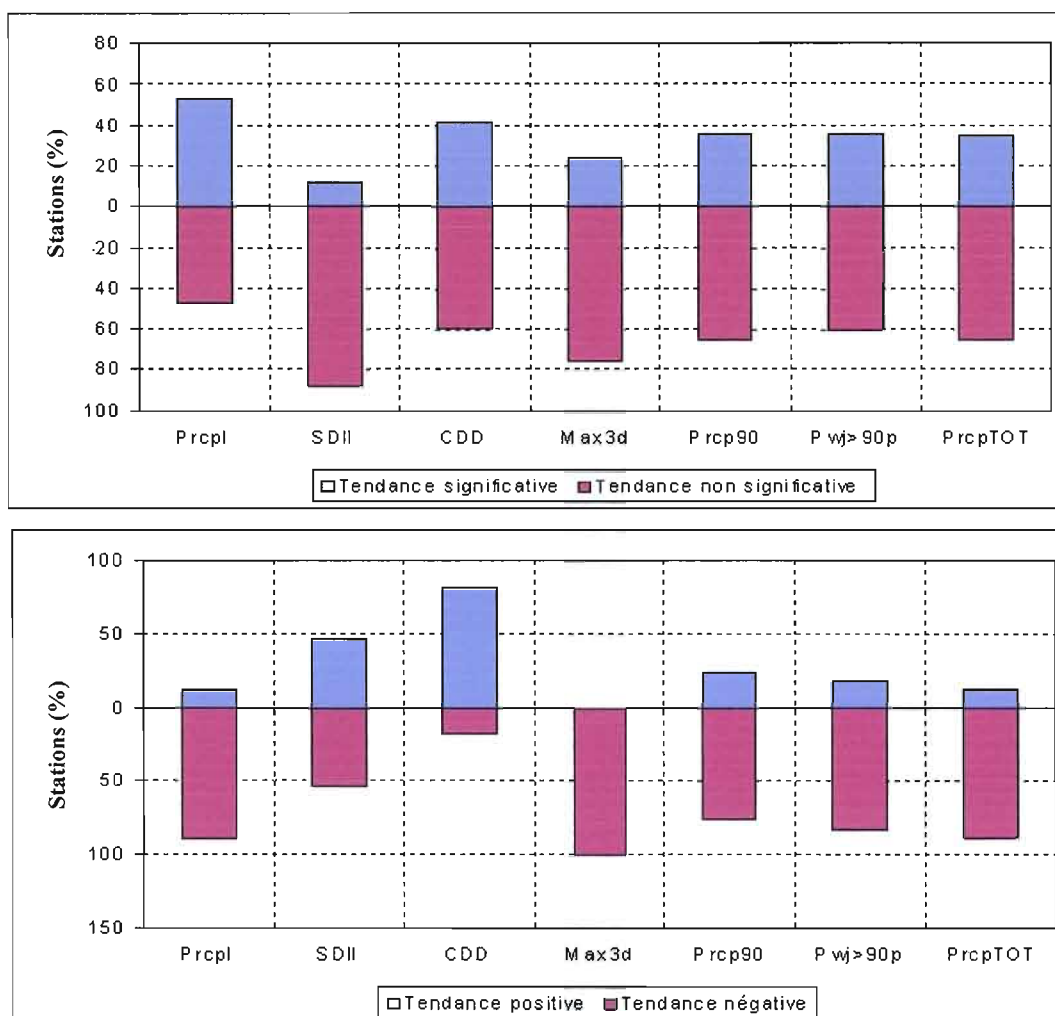


Figure 3.17 Pourcentage du nombre total de stations présentant des tendances significatives positives et négatives au seuil de 95 % (pente de Sen \neq 0) sur la période 1961-2004.

a) Précipitations moyennes annuelles

D'après les résultats présentés au tableau 3.4 et 3.5 la valeur de la pente de Sen calculée sur les 44 ans est différente de 0 pour la majorité des indices. 88% des stations affichent une tendance à la baisse de la précipitation mensuelle totale, dont 35 % présentent une tendance statistiquement significative au seuil de 95 % (cf. tableau 3.4 et 3.5 et figure 3.17). Les stations de Zorgho et Boulssa dans la région soudanienne, de Toungouri dans la zone nord soudanienne ; et celles de Dakiri, Barsalogo et Sebba sont les plus touchées par cette tendance à la baisse de précipitations totales (cf. tableaux 3.4 et 3.5).

a) Indices pluviométriques

La figure 3.12 montre que le pourcentage de stations affichant une tendance positive est nettement inférieur à celui des stations présentant des tendances négatives, exception faite du cas du maximum de jours consécutifs secs (CDD). Comme le montre les tableaux 3.4 et 3.5, 88% des stations présentent des tendances négatives dont 53 % sont statistiquement significatives au seuil de 95 % pour le nombre de jour humide (Prcp1). Quand aux jours consécutifs secs (CDD), 82 % des stations présentent une tendance à la hausse dont 41 % sont statistiquement significatives au seuil de 95% (cf. tableau 3.4). Les stations concernées par cette hausse des séquences sèches sont celles de Koupela, Boulsa, Gayeri, Dakiri, Barsalogho, Sebba et Kollo. La tendance de l'intensité (SDII) de précipitations est à la hausse dans la partie nord et à la baisse dans le sud et à l'est du bassin dans les stations de Barsalogho, Aribinda et Bani. Près de 47 % des stations affichent une tendance positive contre 53 % de tendance négative. La majorité des stations (100%) ont une tendance négative en ce qui concerne le maximum de précipitations en trois jours consécutifs (Max3d), le 90^e centile de précipitation (Prcp90). Il en est de même pour le nombre de jours de précipitation supérieure au 90^e centile (Pwj>90).

Conclusion

L'analyse des précipitations quotidiennes sur le territoire de la Sirba durant la période 1961- 2004 a mis en évidence trois périodes bien distinctes : une période humide de 1961 à 1969 au cours de laquelle les valeurs moyenne de la pluviométrie sont au dessus de la normale ; une période sèche de 1970 à 1989 pour laquelle la majorité des années sont déficitaires ; et une période moyenne plus humide de 1990-2004 dont les valeurs se rapprochent de la normale (1961-1990). La distribution du cumul moyen mensuel des pluies est très variable au cours de la saison, les mois de juin, juillet, août et septembre sont les plus pluvieux. L'analyse du régime de distribution en 1984, 1994 et 2004 indique une baisse des contributions des mois de juillet-août durant les périodes sèches (1984) et une augmentation de celle-ci au cours des périodes humides (1994) où les précipitations sont surtout concentrées sur les mois de juillet, août et septembre au détriment des mois d'avril, mai et octobre.

Une tendance significative à la baisse du pourcentage de jours humides s'observe sur la quasi-totalité des stations de la Sirba, alors que le maximum de jours consécutifs secs a subi une augmentation au cours de la période sèche 1970-1989. L'intensité moyenne par jour de pluie n'a pas varié de façon aussi homogène sur le territoire. La précipitation totale affiche une tendance à la baisse des pluies mais pas de façon générale sur toutes les stations. Parmi les extrêmes pluviométriques seul le maximum de précipitation en trois jours consécutifs présente une tendance à la baisse de façon systématique. Ces modifications du régime des précipitations ont eu des effets majeurs sur l'écoulement des eaux de la Sirba, sur l'environnement naturel et humain que nous allons aborder dans le chapitre suivant.

3.2 Influence des fluctuations du régime de précipitations sur les ressources en eau

Les effets de la distribution saisonnière des précipitations sur le module moyen mensuel de la Sirba et sur la variabilité interannuelle de l'écoulement des eaux de surface sont analysés dans cette section. Comme mentionné au chapitre 2, la pluie moyenne sur le bassin a été calculée par la méthode de Thiessen (cf. section 2.2.4), en utilisant les données couvrant la période de 1963-1990 des stations situées à l'intérieur et à l'extérieur (Djibo et Kaya) du bassin de la Sirba dont les apports d'eau contribuent à l'écoulement de la Sirba (tableau E.1 de l'annexe E). Le tableau E.2 présente les débits moyens mensuels de la Sirba à Garbbé-Kourou sur la période 1963 -1990 qui ont permis d'analyser l'évolution interannuelle et intra-saisonnière de l'écoulement en lien avec celle des précipitations.

3.2.1 Variabilité interannuelle des écoulements standardisés

Le module moyen annuel de la Sirba à Garbbé-Kourou, calculé sur la période 1963-1990, est de $22,1 \text{ m}^3/\text{s}$. Un écart de $61,5 \text{ m}^3/\text{s}$ a été observé entre le débit moyen (mai – octobre) le plus fort ($64,8 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1988) et le plus faible ($3,3 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1968). Dans l'ensemble, l'écoulement de la Sirba a connu des variations au cours de la période 1963-1990, suite aux déficits pluviométriques qui ont marqué les décennies 1970 et 1980, en particulier la recrudescence des sécheresses successives des années 1980 à 1989. Les figures 3.18 et 3.19 illustrent l'évolution interannuelle des écoulements standardisés de la Sirba à Garbbé-Kourou, et la Faga à Liptougou, sur les périodes 1963-1990 et 1973-2002, respectivement.

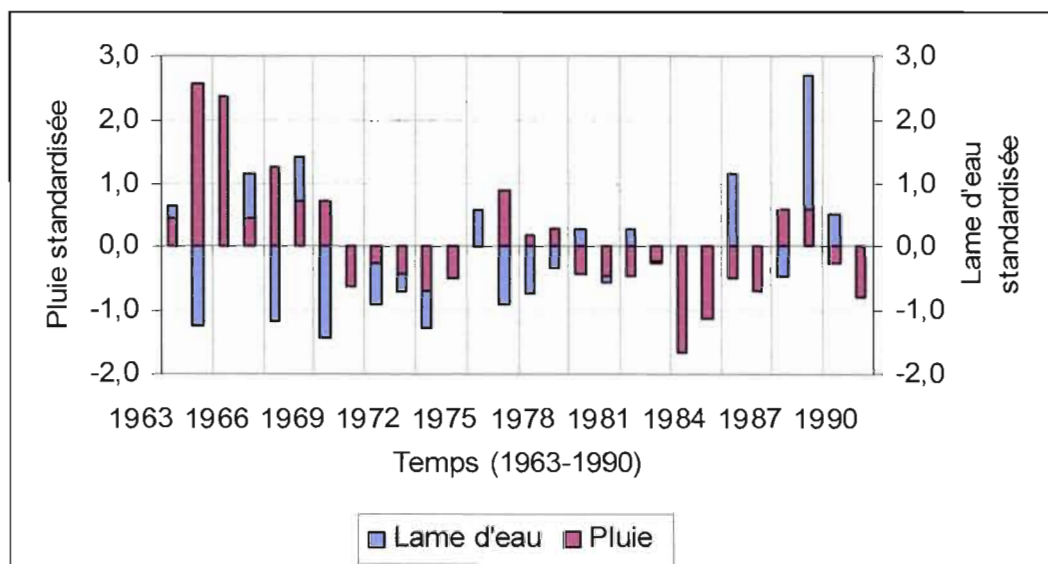


Figure 3.18 Évolution de la précipitation moyenne pondérée par la méthode de Thiessen sur l'ensemble du bassin (rouge) et Lame d'eau écoulée de la Sirba à Garbé-Kourou (bleue), standardisées par l'écart-type par rapport à la moyenne 1963-1990. (Source : AGRHYMET, 2004)

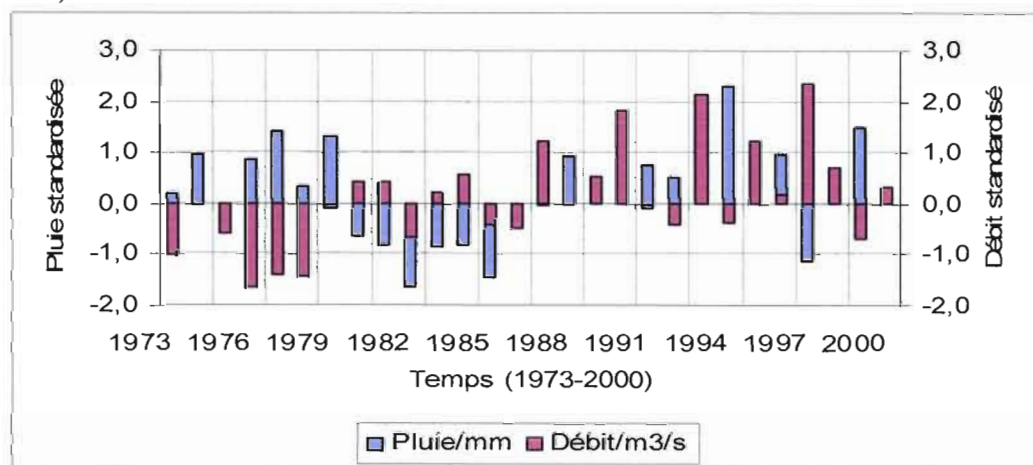


Figure 3.19 Évolution du débit moyen standardisé de la Faga à Liptougou par rapport à la moyenne 1973-1990 et de la pluviométrie moyenne standardisée à la station de Bogandé (Source : AGRHYMET, 2004).

La figure 3.18 montre que le régime d'écoulement des eaux de la Sirba a subi des modifications majeures durant la période 1963-1990, avec une recrudescence des années de faible débit au cours des années 1968 à 1973, concomitante avec les années de sécheresses précédemment analysées. Une augmentation du module moyen de la Sirba a été observée au cours des années 1974 à 1979, suivi d'une diminution durant les années 1980 à 1987. Ces déficits s'expliquent surtout par l'irrégularité du régime des pluies qui alimentent les écoulements, en lien avec une baisse du nombre de jours de pluie telle qu'analysée précédemment durant ces mêmes années, et en raison de l'intense évapotranspiration sur l'ensemble du bassin versant de la Sirba.

Les figures 3.18 et 3.19 indiquent que le débit a connu des déficits au cours des décennies 1970 et 1980, à cause de la baisse des apports d'eau de pluie à l'écoulement durant cette période. Elles montrent cependant que ces variations ne suivent pas nécessairement les anomalies des quantités cumulées de précipitations annuelle ou saisonnière. En effet, des années de forte pluviométrie à l'échelle annuelle ne correspondent pas nécessairement à une forte hydrométrie (1963, 1966, 1968, 1970, 1972, 1977), tandis que quelques années à faible pluviométrie peuvent produire un ruissellement supérieur à celui des années plus humides. Ce comportement se remarque également sur la Faga à Liptougou, principal affluent de la Sirba. La figure 3.19 montre que le débit de la Faga n'a pas suivi l'augmentation des pluies au cours des années 1973 à 1979. D'autres facteurs autres que le régime des pluies peuvent intervenir dans le régime d'écoulement des eaux de surface, notamment par l'augmentation du ruissellement suite aux modifications du mode d'occupation des terres intervenues au cours des trois dernières décennies (Mahé et Olivry, 1995; Peugeot, 2003). Bien que l'alimentation en eau de la Sirba provient essentiellement des précipitations saisonnières. Elle n'explique pas en totalité toutes les modifications du régime des écoulements. Une analyse du régime saisonnier de l'écoulement en lien avec la distribution des événements de précipitations est présentée dans la section suivante, afin de mieux comprendre le comportement de l'écoulement au cours de l'année.

3.2.2 Variabilité intra-saisonnière des écoulements

L'évolution intra-saisonnière de l'écoulement des eaux de la Sirba est intimement liée à celle de la distribution des précipitations. Dans l'ensemble, la réponse du bassin aux apports

pluviométriques débute en juin lors de l'occurrence des pluies régulières et intense, et se poursuit de façon progressive pour atteindre son maximum en septembre. À partir de là, s'amorce généralement la décrue et l'arrêt complet des écoulements en octobre. Toutefois, ce portrait général peut être très variable selon les années (cf. figures 3.20 et 3.21).

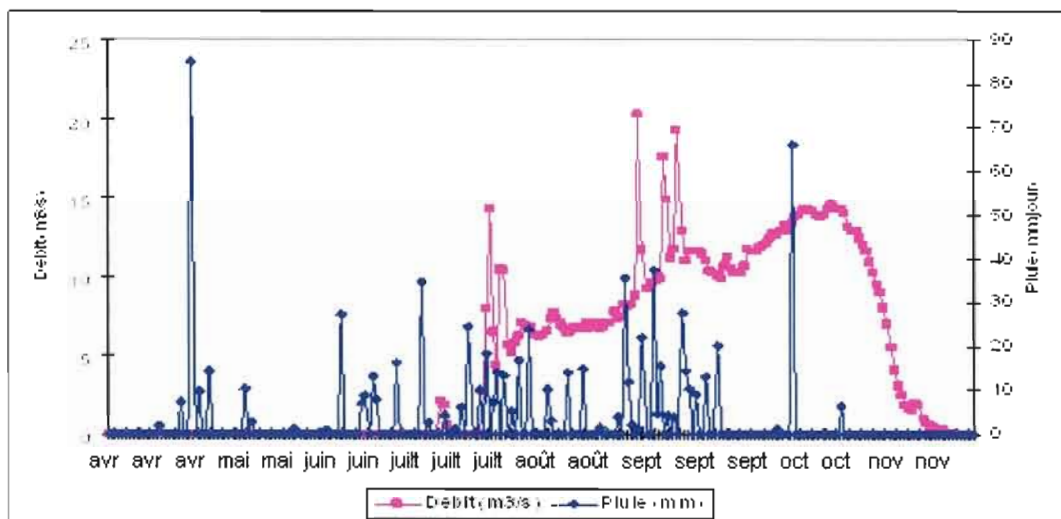


Figure 3.20 Évolution intra-saisonnière de l'écoulement à Garbé-Kourou à l'embouchure de la Sirba avec le Niger et des précipitations à Bogandé en 1968.

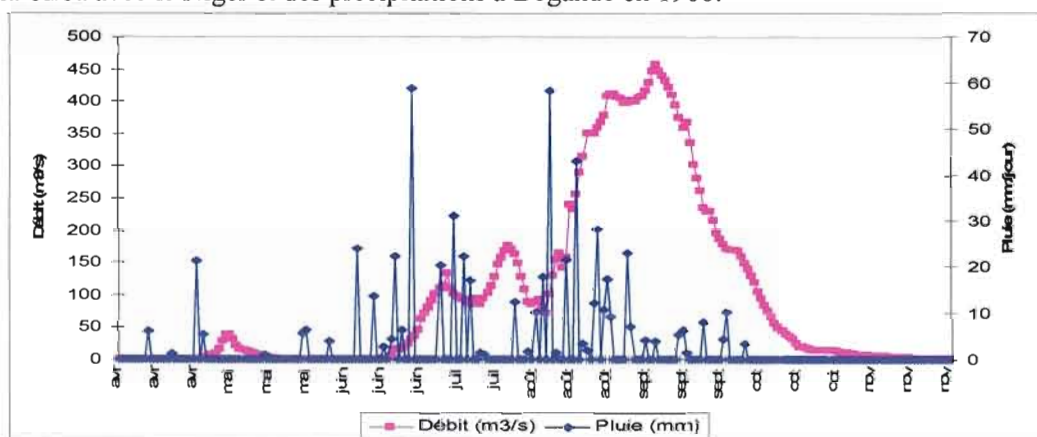


Figure 3.21 Évolution intra-saisonnière de l'écoulement à Garbé-Kourou à l'embouchure de la Sirba avec le Niger et des précipitations à Bogandé en 1988.

Comme le suggèrent les figures 3.20 et 3.21 qui présentent l'évolution des débits à Garbékourou et des précipitations quotidiennes à la station de Bogandé⁵, au cours des années 1968 et 1988. L'année 1968 présente une pluviométrie abondante (647,2 mm) mais à faible hydrométrie (2,5 m³/s) par rapport à la moyenne de la période 1963-1990 (cf. figure 4.3) et la deuxième a une faible moyenne pluviométrique annuelle (633,5mm), avec un fort débit (63 m³/s), soit en 1et 1988 respectivement, comme suggéré dans la section précédente. Il ressort que la distribution saisonnière des pluies joue un rôle très important sur l'écoulement des eaux de la Sirba. En 1968 (cf. figure 3.20), les pluies journalières étaient moins intenses mais régulières durant toute la période humide (cf. figure 3.3, chapitre 3 section 3.1.2), avec un débit très faible à l'embouchure de la Sirba à Garbé-Kourou, soit 2,5m³/s. Tandis qu'en 1988 (cf. figure 3.1), l'écoulement a été tardif (mi-juin) à cause de l'intermittence des pluies en début de la saison. Celles-ci étaient concentrées sur une courte période (juillet –septembre) et le mois d'août a enregistré à lui seul 240 mm avec un module de 64,8 m³/s provoquant ainsi des crues subites en septembre. (cf. figure 3.6, section 3.1.2 chapitre III).

3.2.3 Disponibilité des ressources en eau

Le bassin versant de la Sirba est relativement bien pourvu en barrages. Près de 70 retenues y ont été aménagées depuis les années 1960 pour le stockage temporaire des écoulements destinés à l'irrigation. Ces retenues représentent un volume maximal de 132 millions de m³. Les barrages rencontrés dans le bassin versant de la Sirba sont constitués par des retenues de moyenne capacité de stockage : 0.2 à 0.4 millions de m³ d'une digue construite en terre. Plusieurs de ces barrages ont subi des réhabilitations depuis leur construction et à l'heure actuelle, en effet la majorité demeure dans un état fonctionnel satisfaisant. Le barrage sur la Sirba à Sirba, avec 30 millions de m³ de capacité de stockage, compte parmi les grands barrages du Burkina Faso. La disponibilité théorique (eaux de surface et souterraine confondues) est de 472 m³/hbt/an contre 1750 m³/hbt/ an pour toutes les eaux du Burkina Faso (cf. figure 3.22).

Cette quantité moyenne, très faible, place le bassin en dessous du seuil de pénurie d'eau, qui est de 1000 m³/hbt/an. La disponibilité en eau par habitant est très inégalement

⁵ Station jugée représentative des caractéristiques climatiques du bassin par le Laboratoire d'hydrogéologie de Ougadougou au Burkina Faso.

répartie entre les provinces. Elle varie de 7 m³/hbt/an dans le département de Téra à 1800 m³/hbt/an dans la province de Gnagna. Comme montré sur la figure 3.22, 45 % des provinces sont au-dessus du seuil de pénurie d'eau. Les provinces les plus défavorisées en terme de disponibilité de ressources en eau sont celles de Séno, Gourma et les départements de Say et Téra (cf. figure 2.2 chapitre II). Tandis que les plus favorisées sont les provinces de Gnagna, Kouritenga, Namentenga et Kollo. Il faut souligner que plus de la moitié de cette quantité d'eau disponible est évaporée (Savado, 2004).

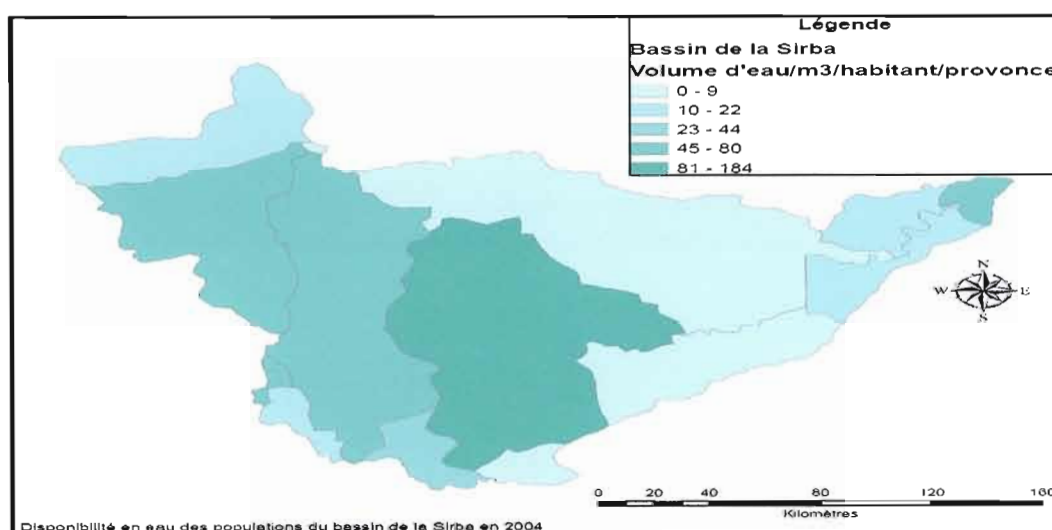


Figure 3.22 Disponibilité annuelle en eau par province et par habitant en 2004 sur le bassin de la Sirba

Tableau 3.6 Caractéristiques des eaux souterraines du bassin de la Sirba (Source : carte des ressources en eau du Burkina Faso 1991).

Provinces	Profondeur de la nappe	Taux de réussite	Débit forage (m ³)	Réserve %	Niveau statique(m)	Recharge %
Ganzourgou	54	72	3,8	15	3	4
Gnagna	56	61	3,4	18	3	3
Gourma	51	75	4,5	12	3	4
Kollo	65	64	2,9	11	4	2
Kouritenga	49	68	4,2	10	3	4
Namentenga	57	70	3,8	15	3	3
Sanmatenga	58	64	3	16	3	3
Say	58	68	4,4	12	3	3
Séno	54	61	3,4	18	1	2
Soum	54	60	2,7	17	2	2
Téra	56	65	3,0	12	4	3

La saisonnalité des précipitations et l'intense évapotranspiration sont les principaux facteurs qui aggravent le déficit hydrique sur le bassin au cours de la saison sèche. Par conséquent, la population a recours aux sources d'eau souterraines pour la satisfaction des besoins domestiques. Cependant, les formations cristallines sont pauvres en eau souterraine ce qui limite fortement la possibilité de réaliser des forages à débit important, obligeant ainsi à recourir aux eaux de surface pour l'alimentation en eau la population (par exemple le barrage de Ziga). Ainsi dans la zone de socle qui constitue plus de 80 % du bassin, les débits moyens obtenus dans les forages sont de l'ordre de 2 m³/h. Les données du tableau 4.1 précisent les caractéristiques essentielles des eaux souterraines du bassin de la Sirba.

3.3 Portrait environnemental

Les images NOAA, Landsat 5 et 7, ainsi que les informations sur le taux d'utilisation des terres ont été utilisées afin d'établir le portrait environnemental et appréhender les changements des facteurs environnementaux, qui contribuent à accroître au cours du temps le niveau de vulnérabilité des populations du bassin de la Sirba. Les résultats du traitement d'images ont permis d'analyser la variabilité interannuelle et intra-saisonnière de l'indice moyen mensuel de végétation et les changements intervenus au cours de la période 1990-2000.

3.3.1 Variation interannuelle des indices de végétation

Les données de l'annexe E ont servi à l'analyse à long terme des indices de végétation dans le bassin de la Sirba. Les résultats portés sur la figure 3.23 présentent l'évolution interannuelle de l'indice de végétation au cours de la période 1990-1999.

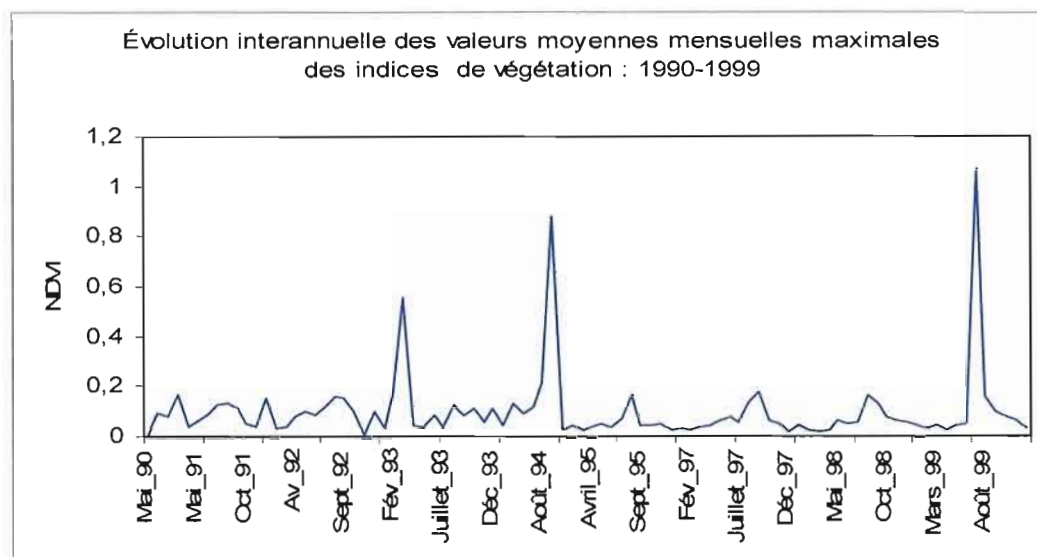


Figure 3.23 Évolution interannuelle des moyennes mensuelles de l'indice normalisé de végétation (NDVI) sur l'ensemble du bassin de la Sirba de mai à décembre pour la période 1990-1999.

La figure 3.23 révèle que la distribution saisonnière du NDVI varie considérablement d'une année à l'autre. La courbe d'évolution est marquée par trois pics caractéristiques : n 1993, 1994 et en 1999. Durant les années 1990 à 1993, les valeurs des indices de végétation sont faibles. Cette période a été suivie par une augmentation des valeurs du NDVI durant les années 1994 et 1999 qui, comme nous l'avons vu précédemment ont été des années humides. En effet le pic de l'année 1994 correspond à la reprise des pluies abondantes en zone sahélienne après la grande sécheresse des années 1980.

3.3.2 Évolution saisonnière des indices de végétation

Les valeurs de la pluviométrie moyenne mensuelle (de janvier à décembre) moyennée spatialement sur le bassin sur la période 1990-1999 et de l'indice normalisé végétation (NDVI) moyen mensuel (de janvier à décembre 1994) sur l'ensemble du bassin de la Sirba ont été utilisés afin de montrer la similarité entre la répartition saisonnière de l'indice de végétation et le régime pluviométrique moyen mensuel. Celle-ci présente des données complètes de NDVI de janvier à décembre (cf. figure 3.24).

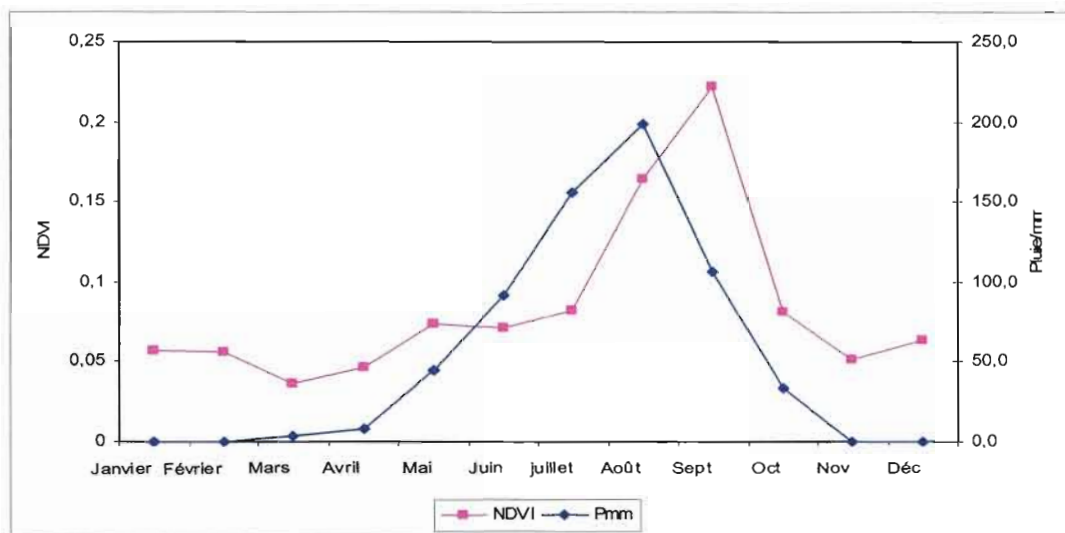


Figure 3.24 Distribution saisonnière des indices normalisés de végétation (NDVI) extraits à partir des images NOAA et de la précipitation moyenne mensuelle moyennée spatialement sur le bassin sur la période 1990-1999.

La figure 3.24 montre une évolution des indices normalisés de végétation en phase avec la pluviométrie. De janvier à avril, les valeurs du NDVI sont très faibles. Elles augmentent progressivement à partir de la deuxième quinzaine du mois de juin à septembre. Cette évolution de l'indice de végétation suit celle des précipitations au cours de l'année, avec un décalage dans le temps de réponse du couvert végétal aux précipitations. L'application du test de Pearson sur le NDVI et la pluviométrie moyenne mensuelle et celle du NDVI de janvier à décembre indiquent qu'il existe une corrélation significative (0,667 avec un $P < 0,005$) entre ces deux variables au cours de l'année. Cependant en comparant le profil des deux courbes, la diminution des valeurs du NDVI entre fin juin et début juillet est plus prononcée que celle des précipitations. Il en est de même pour l'intervalle octobre - novembre. En effet, l'évolution de l'indice de végétation est liée en partie aux pratiques agricoles durant cette période. Les semis en juin se font au détriment de la végétation naturelle qui se reconstitue progressivement en juillet. La récolte des céréales et la sécheresse contribuent aux faibles valeurs du NDVI d'octobre à avril (Pouchin *et al.*, 2002) sur l'ensemble du bassin. Les valeurs de l'indice normalisé de végétation varient de 0,25105 à 0,016671 qui définissent respectivement les formations arborée, arbustive et herbeuse, les zones de culture, les jachères et les sols nus (cf. 3.25)

D'après la figure 3.25 la configuration spatiale des valeurs du NDVI est à l'image de celle des zones pluviométriques définies plus haut (cf. section 3.1.2). Les plus fortes valeurs se rencontrent dans les formations arborescentes et arbustives au sud du bassin dans la région soudanienne où les précipitations sont plus abondantes et le long des cours d'eau, tandis que les plus faibles densités florales se remarquent dans les formations herbeuses de la région sahélienne. La plus faible valeur de l'indice de végétation correspond aux étendues d'eau. Mais la structure d'ensemble de la végétation est morcelée, il n'y a pas une nette distinction entre ces différentes formations. Elles forment un mélange de formations arborescentes entrecoupées par des formations clairsemées et de sols nus visible du sud vers le nord. Ce qui indique la grande utilisation du territoire pour les activités agropastorales dans la partie sud du bassin. L'analyse de l'occupation du sol à l'aide d'images prises à deux dates différentes a servi à détecter les changements intervenus sur le bassin au cours des dernières décennies.

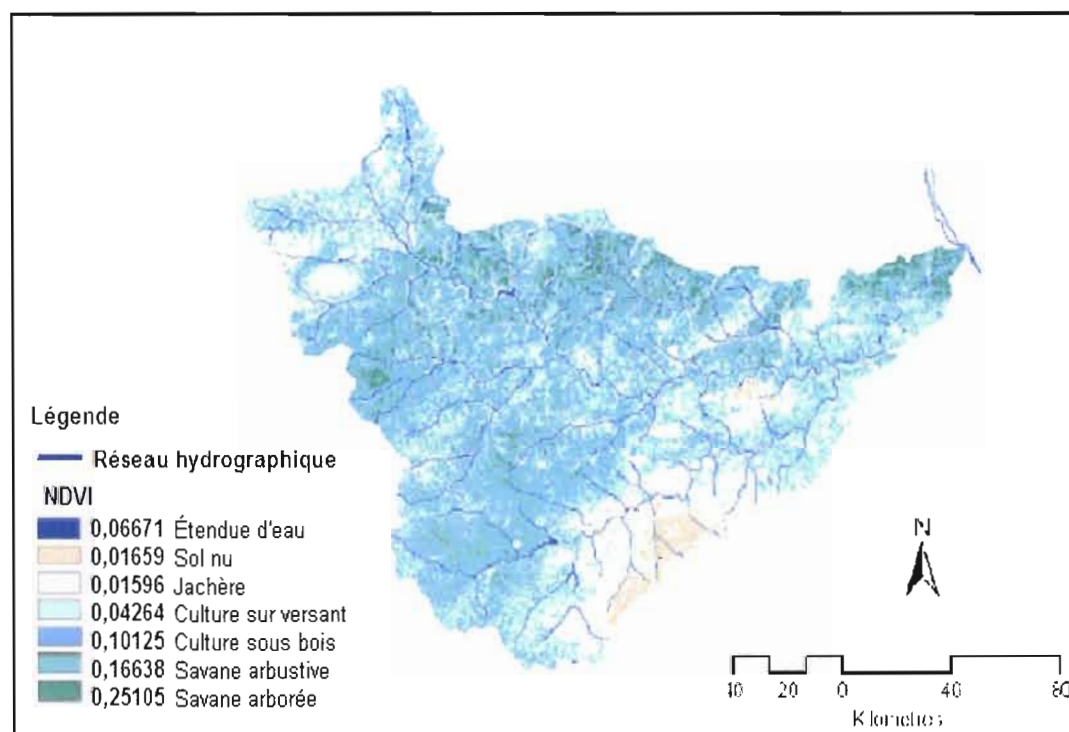


Figure 3.25 Distribution spatiale de l'indice normalisé de végétation en août : 1997 sur le bassin de la Sirba. Source : image NOAA (Centre Régional AGRHYMET, 2004).

Afin de dégager les grands traits de l'occupation du sol du bassin, la classification supervisée a été effectuée sur l'image TM multispectrale à 30 m de résolution du mois d'août 1989 et 2001. La figure 3.26 illustre les résultats de la classification et le tableau 4.4 précise la fiabilité du traitement. La matrice de confusion de l'image Landsat 5 1989 (cf. tableau 3.7) permet de vérifier la pertinence de la classification. Le résultat est bon pour la plupart des classes avec 93, 92 et 85 % pour les classes étendue d'eau, savane arbustive et culture pluviale. Tandis que les classes sol nu, jachère et savane arborée sont classées à 76 et 72 % respectivement. La seconde image a été classée dans les mêmes proportions avec 94 et 92 % pour les classes étendue d'eau, savane arborée, et arbustive et les trois autres classes sont comprises entre 80 et 73 %. Cependant la savane herbeuse n'a pas pu être classifiée. Ces résultats médiocres s'expliquent par le recouvrement des classes. Aussi il est difficile de faire la distinction entre savane herbeuse, zone de culture et jachère. Au total, six (6) classes d'objets ont été identifiées sur les deux figures : étendue d'eau, sol nu, jachère⁶, culture, savane arbustive et savane arborée (cf. figure 3.27).

Tableau 3.7 Matrice de confusion des images Landsat 5 (1989) et Landsat 7 (2001) et pourcentage de pixels classifié par code

Landsat 5 Août 1989								
Nom	Code	Pixels	1	2	3	4	5	6
Étendue d'eau	1	2286	83.0	0	0.00	0.00	0.00	0.17
Sol nu	2	1214	0.83	53	16.47	0.00	0.00	0.00
Jachère	3	1898	0.9	35	81.82	8.83	0.00	0.00
Culture	4	18335	0.0	58	18.95	72.40	8.07	0.01
Savane arbustive	6	17406	0.0	0.00	0.02	6.65	91.19	2.14
Savane arborée	7	16785	0.0	0.00	0	0.04	9.81	90.13
KAPPA COEFFICIENT	0.81637							
Landsat 7 Août 2001 :								
Nom	Code	Pixels	1	2	3	4	5	6
Étendue d'eau	1	2816	94.96	0.00	0.00	0.00	0.00	5.04
Sol nu	2	899	0.00	73.68	26.32	0.00	0.00	0.00
Jachère	3	608	0.00	13.56	80.62	5.82	0.00	0.00
Culture pluviale	4	7263	0.00	2.47	11.82	78.74	6.93	0.01
Savane arbustive	5	4367	0.00	0.00	0.00	5.11	92.28	2.62
Savane arborée	6	6105	0.85	0.00	0.00	0.04	6.25	92.86
KAPPA COEFFICIENT =			0.84496					

⁶ La jachère est une ancienne exploitation agricole abandonnée après un certain nombre d'années qui varie de 3 à 5 ans.

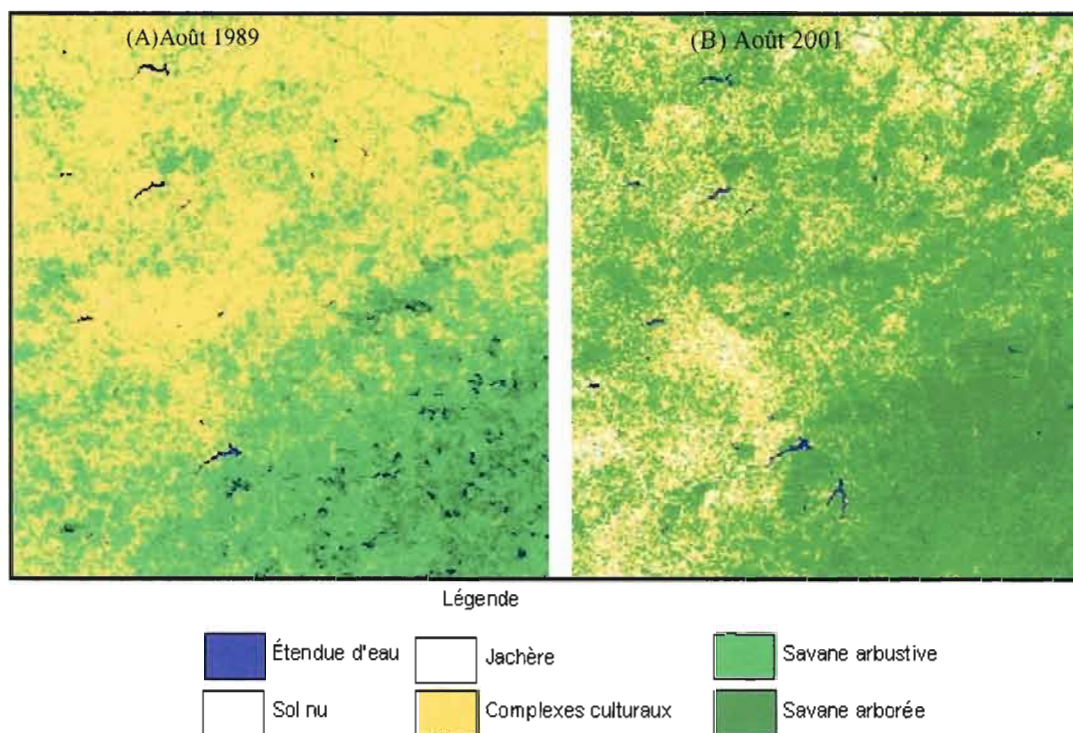


Figure 3.26 Occupation du sol du bassin de la Sirba à l'aide d'image Landsat 7 (A) : août 1989 et (B) : août 2001. (Source : Image Landsat 7 Centre Régional AGRHYMET, 2004).

La figure 3.26 suggère que l'environnement du bassin a subi des modifications entre les années 1989 et 2001. La diminution de la superficie des formations arbustive et arborée au profit des cultures est perceptible sur l'image Landsat 5 de 1989. Tandis que sur l'image Landsat 7 de 2001, on remarque une augmentation des surfaces occupées par ces formations. Cette différence dans la physionomie des formations végétales s'explique par à l'augmentation des précipitations moyennes annuelles sur l'ensemble du bassin en 1999, avec une pluviométrie moyenne annuelle de 590 mm contre 467 mm en 1989. L'extension des zones de culture en 1989 s'explique par le fait que durant la grande sécheresse des années 1970 à 1989, les agriculteurs augmentaient les superficies cultivées pour compenser les pertes de récolte liées à la variabilité des précipitations. La figure 3.27 présente en détail les changements opérés sur le bassin au cours de la période 1989-2001.

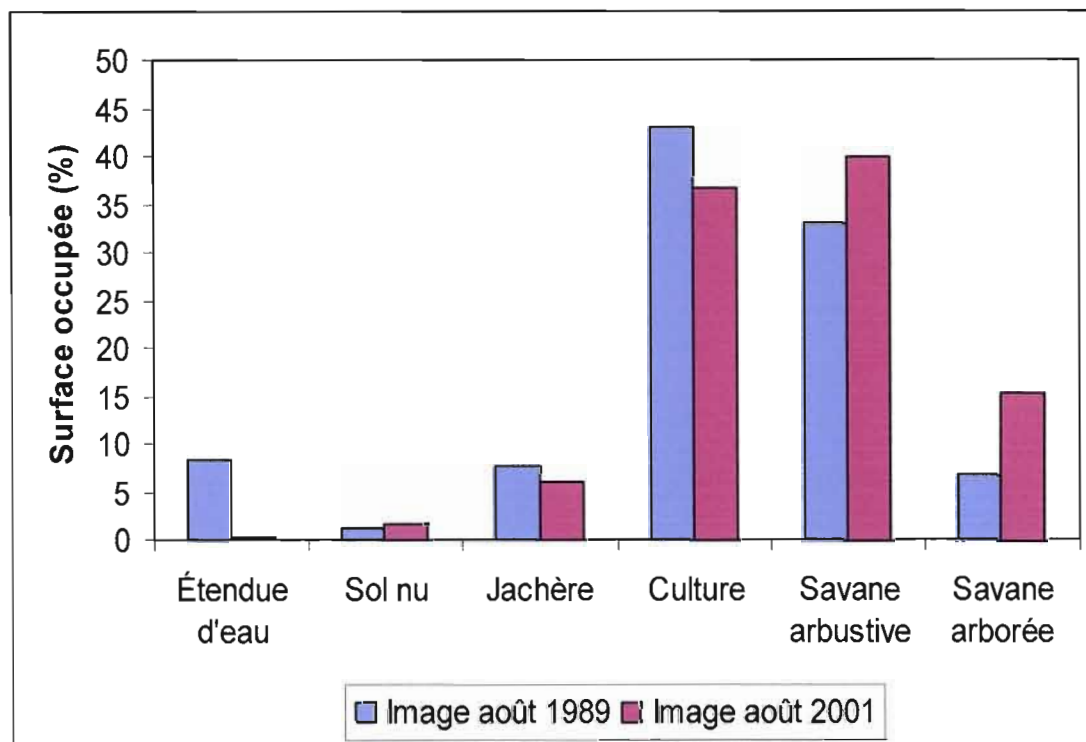


Figure 3.27 Comparaison entre occupation du sol en 1989 et 2001 selon les types d'occupation du sol.

En comparant les pourcentages de superficie occupés par les différentes classes sur les deux images 1989 et 2001 dans la figure 3.28, on remarque que les superficies occupées par le sol nu et les jachères sont quasi identiques (8,32 % et 6,04 %), alors que les étendues d'eau ont fortement diminué de 8,3 % en 1989 à 0,26 % en 2001. Il en est de même pour les zones de culture qui ont connu une diminution de 6 % entre les deux dates. Cependant, une augmentation des superficies occupées par la savane arbustive et la savane arborée a été observée, avec un pourcentage d'occupation de 39,9 et 15,5 % pour l'année 2001 contre 33 et 6,8 % en 1989 respectivement. Cette augmentation a été observée au détriment de la jachère dont la superficie a diminué en 2001. Cette interprétation des données satellitaires a été complétée par l'analyse des données du système TDBASE du Centre Régional AGRHYMET qui fournit les informations sur les taux d'occupation des terres par unité de culture et de bétail) par hectare par province pour l'année 2001. Il s'agissait d'identifier les provinces les plus occupées par les activités agropastorales (cf. Tableau 3.8 et figure 3.28).

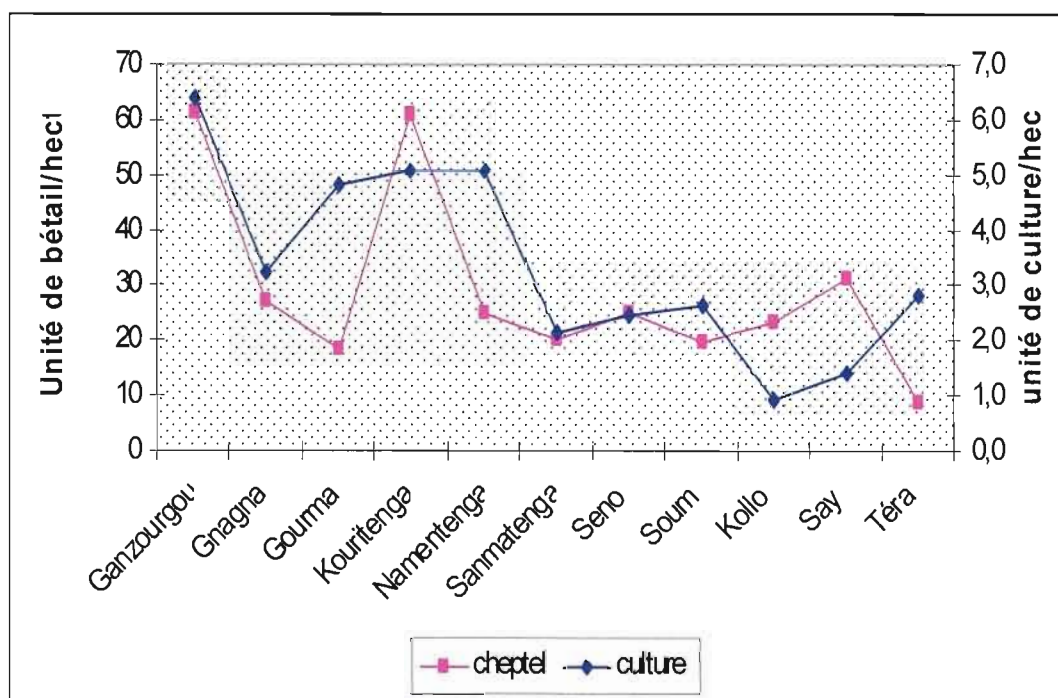


Figure 3.28 Unité de culture et du bétail par hectare selon les provinces (Source : Système de gestion de la base de données thématiques Centre AGRHYMET, 2004).

Tableau 3.8 Évolution du nombre de bétail par hectare sur l'ensemble du bassin de 1989-2001 (Source : Système de gestion de la base de données thématique Centre AGRHYMET, 2004)

années	Gazour gou	Gna gna	Gou rma	Kouri tenga	Namen tenga	Sanma tenga	Séno	Soum	Kollo	Say	Téra
1989	37	20	7	23	15	9	16	7	14	10	6
1990	37	21	8	23	15	9	16	7	15	10	6
1991	38	21	8	24	15	9	16	7	15	11	6
1992	39	21	8	24	15	9	16	7	15	11	6
1993	40	22	8	25	16	10	17	8	16	11	7
1994	40	22	8	25	16	10	17	8	16	11	7
1995	41	23	8	26	16	10	17	8	16	12	7
1996	42	23	9	26	17	10	18	8	16	12	7
1997	43	24	9	27	17	10	18	8	17	12	7
1998	44	24	9	27	17	11	19	8	17	12	7
1999	45	25	9	28	18	11	19	9	17	12	7
2000	45	25	9	29	18	11	19	9	18	13	7
2001	46	26	9	29	18	11	20	9	18	13	8

D'après l'analyse de la figure 3.28 trois grandes zones d'occupation se dégagent quant à leurs caractéristiques d'unité de culture et de bétail par hectare :

- i. les provinces Ganzourgou, Kouritenga présentent un taux d'occupation élevé, avec plus de 60 unités de bétail et six unités de culture par hectare ;
- ii. les provinces de Gourma et de Namentenga et Gnagna présentent un faible taux d'unité de bétail et un taux moyen pour les cultures ;
- iii. les provinces Sanmatenga Seno, Soum, Kollo, Say et Téra ont des taux d'unité de culture et d'élevage les plus faibles de la région.
- iv. Le tableau 4.3 indique que le nombre de bétail par hectare est en augmentation dans toutes les provinces en particulier celles de Ganzourgou, Gnagna, Kouritenga et Namentenga. Cette colonisation de l'espace par le cheptel et les cultures s'accompagne également de sérieux problèmes de dégradation, de pollution et de prolifération de maladies hydriques dans le territoire. Ce facteur fait l'objet d'une analyse détaillée dans la section suivante.

3.3.4 Qualité d'eau

La vulnérabilité des populations du bassin par rapport à la disponibilité de l'eau pour les besoins (domestique, agricole et industriel) de la population est liée à la quantité d'eau, mais aussi à sa qualité. Cette section présente les résultats d'analyse de la qualité de l'eau réalisée par le Laboratoire d'hydrogéologie de l'Université de Ouagadougou ainsi que ceux de l'enquête portant sur les maladies hydriques dans le district sanitaire de Boulsa au Burkina Faso en 2005. La qualité de l'eau est définie comme un ensemble conventionnel de caractéristiques physiques, chimiques, biologiques et bactériologiques, exprimées en valeurs, permettant de classer l'échantillon d'eau dans une certaine catégorie et d'acquiescer ou non l'usage de cette ressource. La comparaison des valeurs obtenues avec les normes maximales admises par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) donne les indicateurs de qualité. Afin d'établir la qualité de l'eau, les analyses effectuées en 2004 ont porté sur les propriétés physicochimiques (Savadogo, 2004) et bactériologiques (ONEA, 2005).

a) Propriétés physicochimiques

Les résultats de l'analyse physicochimique (cf. tableau 3.8) de l'eau indiquent que les eaux des barrages sont toutes basiques avec un pH variant de 6 à 7, tandis que les eaux

souterraines sont acides à l'exception de celles des forages de Léoura et de Kouri Chef (Savado, 2004). La température des eaux varie légèrement d'une période à l'autre mais elle reste toujours comprise entre 30 et 34°C. Les caractéristiques chimiques des eaux souterraines sont définies par leur contenu ionique et leur conductivité qui en résulte. D'après les données du tableau 4.4, la plupart des eaux ont une faible conductivité (entre 200-400 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et un faible contenu ionique. Cependant, celle de Boulsa contient 430 mg de sulfate avec une conductivité de 1121 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ces sulfates trouvent leur origine dans la nature de l'aquifère qui en ces lieux doit contenir des sulfures (pyrites) dont le lessivage modifie les propriétés chimiques de l'eau. Ces concentrations dépassent de loin celle admise par l'OMS (OMS, 2007), ce qui devrait compromettre l'utilisation de ces eaux pour les besoins domestiques.

b) Pollution de l'eau par les micro-organismes

D'après les résultats d'analyse du Laboratoire d'hydrogéologie, les eaux sont plus ou moins polluées comme l'atteste la présence des nitrates dont la teneur devient même excessive pour certains ouvrages comme ceux de Kankassi, Yelsom, Nadoni, et Bilanga. Les résultats d'analyse de l'ONEA, confirment la présence de coliformes fécaux dans les eaux de consommation du bassin (cf. tableau 3.9).

Tableau 3.9 Résultats d'analyses des eaux de forage (A) et de surface (B) du bassin de la Sirba, avril 2005. (Source : Savadogo, 2004)

Localités	T°C	pH	Cond µd/cm	HCO ₃ ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	NO ₂ ⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	SO ₄ ⁻ mg/l	Ca ⁺⁺ mg/l	Mg ⁺⁺ mg/l	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	FeT mg/l	SiO ₂ mg/l
A														
Ecole C puits	31	7	185	35	12	0	52	16	18	4	8	5	1	10
Dispensaire	34	6	171	67	12	0	1	0	8	3	7	2	10	27
DPA/ Boulsa	29	7	705	336	9	0	15	110	84	33	20	4	0	47
Maison/Forage	32	6	345	195	9	13	16	11	37	13	8	3	0	50
Action sociale	32	6	331	128	13	0	17	1	28	17	8	3	0	28
Flanc Colline	34	6	938	153	10	0	6	630	100	136	28	6	0	44
Ecole B	33	6	486	207	9	0	16	65	6	44	23	3	0	48
PEA Forage	33	6	336	116	9	0	32	45	41	8	14	3	0	55
Ecole	33	7	1792	195	24	0	0	1040	222	92	35	5	0	41
M Forage	33	7	529	268	9	3	18	36	36	37	20	3	0	45
Lycée	31	7	492	311	6	3	10	1	36	41	15	5	0	44
Ecole Est	33	6	251	92	11	10	51	2	27	12	8	3	0	39
PDEB Boulsa	34	7	637	238	9	0	7	180	20	55	23	5	0	56
Dispensaire	32	7	386	207	13	0	11	17	30	27	13	3	0	58
Ecole	33	7	504	293	8	0	4	29	26	24	16	4	0	38
Auberge	32	7	553	232	25	0	54	27	48	27	17	4	0	28
Localité B														
	T°C	pH	Cond µd/cm	HCO ₃ ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	NO ₂ ⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	SO ₄ ⁻ mg/l	Ca ⁺⁺ mg/l	Mg ⁺⁺ mg/l	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	FeT mg/l	SiO ₂ mg/l
Kalwarta	33	6	312	195	9	23	14	1	20	14	18	3	0	52
Nienga	33	7	183	92	11	7	10	0	12	8	8	1	0	57
Boulsa	34	6	1121	262	7	0	11	430	92	61	5	5	3	57
Tyelsom	33	7	458	195	17	17	65	9	36	19	16	3	0	47
Boko	33	6	444	268	9	7	18	2	30	21	17	4	0	51
Dargo	33	6	176	85	10	0	3	2	9	4	15	1	0	63
Pièla	33	6	199	85	9	10	18	4	11	8	8	2	2	55
Kalampabou	32	6	202	73	11	17	41	4	8	28	17	1	0	53
Kankassi	34	6	415	177	20	10	74	22	24	9	29	2	0	54
Nadonoul	33	7	485	232	17	7	67	1	33	27	15	4	0	43
Norme		6.5-8.5	400	ND	250	0	50	250-400	50-150	50	200	12	0	ND

La présence de ces micro-organismes dans l'eau de consommation constitue un danger pour la santé des populations (Sharma *et al.*, 1997; Mara, 1998). Conformément aux normes de qualité de l'eau de l'OMS (OMS, 1986), la concentration moyenne de micro-organismes admise est de 74 u/100 ml pour les points d'eau aménagés et 148 u/100ml pour les points d'eau non aménagés. Selon les résultats d'analyses de l'ONEA en 2005, la majorité des forages sont dans les normes à l'exception de la province de Namentenga, qui présente des valeurs supérieures à cette norme, soit 187 u/100 ml pour les forages et les puits.

Ceci s'explique d'une part, par la faible profondeur des puits modernes (8 à 11 m pour les puits modernes et 80 à 100 m pour les forages) par conséquent, ils sont contaminés par leur environnement immédiat comme le suggère la figure 3.29. Ces eaux, malgré le risque pour la santé publique sont souvent utilisées à des fins domestiques. Ceci s'explique par le fait que les femmes fréquentent les points d'eau les plus proches de leur habitat ce qui favorise le creusage des puits traditionnels dans les villages ou l'utilisation des eaux de surface disponibles sans respects des normes d'assainissement minimales. D'autre part, les puits modernes sont conçus de telle sorte que l'on peut enlever le couvercle pour puiser directement l'eau en cas de panne de la pompe manuelle, constituant également un risque majeur de contamination. Contrairement aux points d'eau améliorés, les puits artisanaux et les marigots ont une concentration très élevée de nitrate. C'est le cas des eaux de surface de Bilanga qui ont une forte concentration de microorganismes. Comme le suggère la figure 3.30, les puits à grand diamètre et les puits traditionnels présentent des risques de contamination car la concentration des coliformes fécaux est élevée surtout en début et fin de la saison humide; lorsque la violence de la pluie entraîne les différents contaminants dans les eaux de ruissellement qui les acheminent vers les cours d'eau.

3.3.5 Maladies hydriques : cas du District sanitaire de Boulsa

Les résultats d'analyse de l'ONEA ainsi que ceux du Laboratoire d'hydrogéologie de l'université du Burkina Faso, ont confirmé la pollution des eaux de consommation notamment celles des puits et de surface comme précisé à la section précédente. Pour établir le lien potentiel entre le niveau de contamination et les maladies chez les populations, une enquête sur les maladies d'origine hydrique auprès du Service de statistique du District sanitaire de Boulsa, dans la Province de Namentenga au Burkina Faso a été menée en 2005 lors de la collecte des données de terrain (cf. tableau 3.10).



Figure 3.29 Puits à grand diamètre utilisé pour l'abreuvement du cheptel et puits traditionnel utilisé pour les besoins domestiques dans le village Nianga département de Boulsa au Burkina Faso (Source : photo prise lors de la collecte de données sur le terrain en 2005).

Tableau 3.10 Cas de maladies hydriques enregistrés au cours des années 2001, 2002, 2003, 2004 et 2005 dans le Département de Boulsa (source : District sanitaire de Boulsa, 2005).

Maladies	Années	Période de l'année				TOTAL
		1 ^{er} trimestre	2 ^{ème} trimestre	3 ^{ème} trimestre	4 ^{ème} trimestre	
Paludisme	2001	4250	4421	6787	6176	21634
	2002	4687	4045	7414	9728	25874
	2003	7986	7216	13018	10074	38294
	2004	8890	9201	11506	10049	39646
	2005	8228	7520	11185	ND	26933
Diarrhée	2001	610	1050	594	1207	3461
	2002	1041	1191	589	1313	4134
	2003	1108	927	998	665	3698
	2004	1330	2746	1332	1646	7054
	2005	1480	1721	1055		4256
Schistosomiase	2001	77	158	59	80	374
	2002	82	101	55	52	290
	2003	55	132	47	50	284
	2004	79	62	45	44	230
	2005	75	112	36		223
Ver de Guinée	2001	0	1	3	21	25
	2002	4	1	15	8	28
	2003	0	0	7	0	7
	2004	0	0	2	2	4
	2005	0	1	17		18

Le tableau 3.10 présente la prévalence d'un certain nombre de maladies tels que le paludisme et la diarrhée, la schistosomiase et le ver de Guinée en 2001, 2002, 2003, 2004 et 2005. Le nombre de cas de maladies hydriques rapportées sur la population du district révèle que le pourcentage de personnes atteintes s'élève à 24,6 %, 3,4 %, et 0, 2 % pour ces quatre infections respectivement. Selon ces pourcentages, le paludisme est donc la plus répandue des maladies causées par l'eau. La variabilité du nombre de cas selon les trimestres est liée à la variation saisonnière des conditions climatiques (température et précipitation) au cours de l'année. Comme le précisent Saunders et Warford (1976), l'incidence de nombreuses maladies liées à l'eau dépend du climat, de la géographie, de la culture, des habitudes d'hygiène, des installations sanitaires, de la qualité de l'eau utilisée et du mode d'évacuation des immondices. Le nombre de cas a augmenté de plus de 45 % et 50 % pour le paludisme et la diarrhée de 2001 à 2004, tandis que ce pourcentage a diminué pour la schistosomiase et le ver de Guinée en 2003 et 2004. En 2005 le nombre de cas a sensiblement diminué pour toutes les maladies. Cette baisse est attribuable aux campagnes de sensibilisation entamées par le gouvernement burkinabé et les ONGs. Ceci laisse présumer que l'éducation relative à

l'hygiène de l'eau reste le seul moyen de réduire les risques de maladies hydriques (cf. figures 3.30 et 3.31).

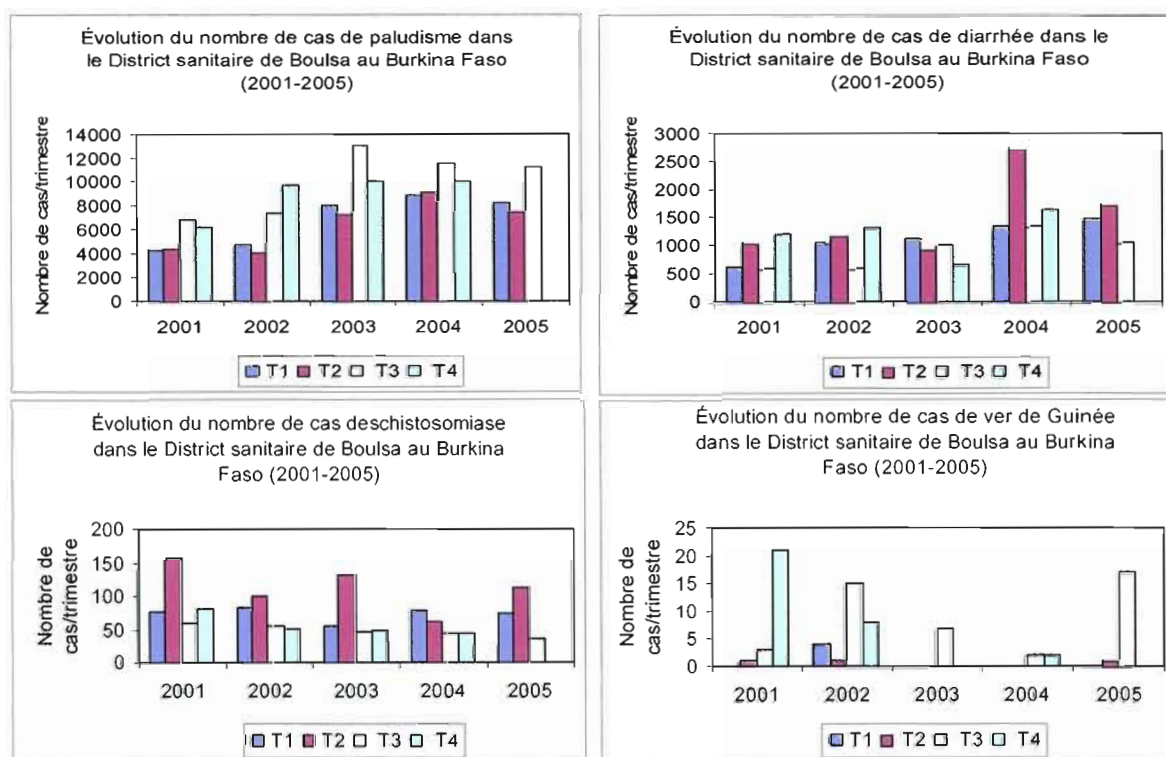


Figure 3.30 Évolution des maladies hydriques à Boulsa entre 2001-2005 (Source : District sanitaire de Boulsa, 2005).

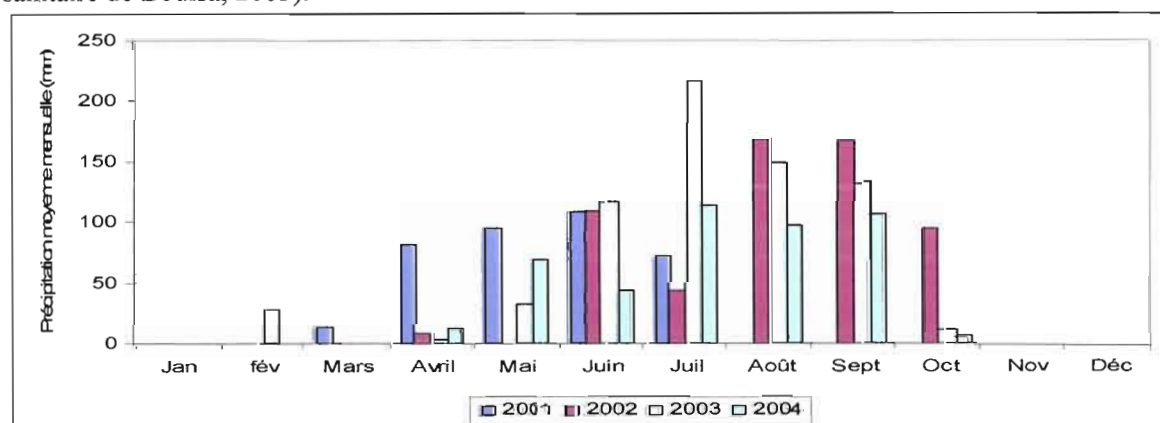


Figure 3.31 Évolution des précipitations moyennes mensuelles à la station de Boulsa pour les années 2001 à 2004 (Source : AGRHYMET, 2004).

La figure 3.30 montre que le nombre de cas de paludisme est faible durant les deux premiers trimestres, et élevé au cours des deux derniers trimestres. Tandis que le nombre de cas de diarrhée reste élevé au cours des deuxième et quatrième trimestres. Il en est de même pour la schistosomiase. D'après les figures 3.30 et 3.31, l'évolution des maladies hydriques est en lien direct avec le régime de distribution des précipitations au cours l'année. Durant la saison sèche, les microorganismes vivent à l'état latent dans les abords des villages, par conséquent le nombre de cas maladies est faible. Mais les premières pluies des mois d'avril à juin lessivent le sol et drainent les germes infectieux vers les points d'eau proches (bas-fonds aménagés). Les microorganismes abondent dans ces eaux souillées par les déjections animales et humaines, et leur transmission à l'homme se fait par simple ingestion d'eau infectée. D'où l'augmentation du nombre de cas de diarrhée et schistosomiase durant le deuxième trimestre. La diarrhée est plus fréquente lors des événements sporadiques de pluie.

Le nombre de cas de paludisme augment au cours des deux derniers trimestres avec l'augmentation des pluies durant les mois de juillet, août et septembre période de développement des moustiques vecteurs de la maladie. Cette évolution saisonnière du nombre de cas de maladies hydriques varie selon les années, en partie selon les fluctuations du régime des pluies. Ainsi, le nombre de cas de paludisme a augmenté de 2001 à 2003. Tandis que le nombre de cas de paludisme n'a pas connu une augmentation notable qu'en 2004. Par contre, le nombre de cas de schistosomiase a progressivement diminué de 2001 à 2005. Quant au ver de Guinée, il présente une évolution très variable selon les années avec une tendance à la baisse du nombre de cas.

Conclusion

L'analyse de l'évolution à long terme (1963-1990) des écoulements de la Sirba et celle de la pluie moyenne sur l'ensemble du bassin a montré que la baisse des débits observée dans les années 1970 et 1980 est liée à la diminution des pluies pour la même période, celle-ci constitue la seule source d'alimentation des cours d'eau du bassin. Les perturbations identifiées dans le régime d'écoulement des eaux ont été attribuées à l'irrégularité du régime de distribution des pluies selon les années pour la période 1963-1990. Certaines années ont un excédent/déficitaire hydrique pour une pluviométrie déficitaire/excédentaire.

L'évolution saisonnière et interannuelle des indices de végétation est liée au régime de distribution des précipitations saisonnières selon les années. Les variations observées sur l'évolution interannuelle des indices normalisés de végétations indique que le couvert végétal du bassin est en phase de régénération mais pas de façon significative à cause des activités agropastorales. Ces changements décelés dans l'occupation du sol entre l'année 1989 et celle de 2001 concernent les formations arborescentes et arborées. Les taux d'occupation des terres par les cultures et le bétail est en augmentation suite à la croissance de la population au cours des trois dernières décennies. Par ailleurs, la présence de taux de nitrate élevé et celle des microorganismes dans l'eau de consommation affecte la qualité et constitue une menace pour la santé publique. Ainsi, les maladies tels que : le paludisme, la diarrhée et la schistosomiase sont entre autres les principales maladies hydriques rencontrées.

CHAPITRE IV

ANALYSE DES CARACTÉRISTIQUES SOCIO-ÉCONOMIQUES ET CAPCITÉS SOCIO-INSTITUTIONNELLES

Ce chapitre présente les activités agricoles et leur fluctuation en lien avec la variabilité des indices pluviométriques, les conditions démographiques, le bien-être social et les infrastructures socio-institutionnelles dont disposent les populations du bassin de la Sirba pour faire face à la variabilité des précipitations.

4.1 Caractéristiques économiques

L'agriculture et l'élevage constituent les principales activités de l'économie du Burkina Faso. Elles occupent près de 80 % de la population active (MED, 2003). La population du bassin de la Sirba essentiellement rurale, est composée d'agropasteurs avec 68,1 % d'agriculteurs et 26,4 % d'agropasteurs (Savadogo, 2004). Les productions agricoles se composent essentiellement de céréales sèches (mil, sorgho, riz, maïs et fonio surtout) et d'oléagineux. Les légumineuses cultivées sont le niébé, le sésame, le vandzou. Les cultures de rente, sont le coton (principalement dans le sud du bassin Kouritenga et Ganzourgou). La céréaliculture est destinée à l'autoconsommation, tandis que les cultures de rente sont acheminées vers les marchés. Ces cultures bénéficient de l'apport substantiel d'engrais et d'autres produits chimiques (insecticides et herbicides).

4.1.1 Pratiques agricoles

Les pratiques agricoles décrites ci-dessous reposent sur trois systèmes de production : vivrière, de rente et pastorale. La pratique à la fois des systèmes de production vivrière, de rente et l'élevage des petits ruminants ont pour objectif d'assurer la sécurité alimentaire en cas de mauvaise récolte. L'agriculture pluviale occupe plus de 80 % du territoire agricole alors que l'irrigation ne touche que 3% (Dembélé, 2001). La production agricole est liée aux caractéristiques des sols, et également aux conditions climatiques. Par exemple, le manque

d'eau, en association aux températures maximales avoisinant 45°C à certaines périodes de l'année, est l'un des facteurs limitant de la production agricole dans la région (Sanders et Shapiro, 2003). La presque totalité de la population rurale vit à la limite ou même en dessous du seuil de pauvreté (1 \$ par jour par personne), en raison notamment de la faible productivité agricole et du nombre élevé de sans emploi dans la région. Les pratiques agricoles se caractérisent par une production de subsistance dominée par de petites exploitations familiales (de 3 à 6 hectares pour 7 à 8 actifs par exploitation). Il y a un faible niveau d'investissement et de développement dans la plupart des infrastructures agricoles. Le travail des champs se fait à la houe (daba) pour le labour, à la hachette ou à la machette pour les défrichements. En conséquence, la taille des surfaces cultivées et les rendements sont modestes : 250 à 500 kg de céréale par hectare. Par comparaison, les rendements au Canada peuvent atteindre facilement 2,68 tonnes de céréale par hectare (Delate et Cambardella, 2004).

La traction animale reste la seule alternative au travail manuel. Elle est surtout utilisée dans les cultures de rente (arachide et coton). Les paysans utilisent le feu pour nettoyer et fertiliser le champ. Cette technique continue à causer des dégâts à l'environnement, car le feu mal contrôlé brûle parfois des centaines d'hectares de végétation. La pauvreté du sol en matières minérales disponibles minéraux (phosphore et azote) et en humus s'ajoutent à la maigre capacité de conservation de l'eau, des sols, limitant d'autant la productivité agricole dans la région sahélienne (Sanchez et Leakey, 1996; Voisins, 1997). En outre, la contrainte majeure à l'expansion des cultures irriguées correspond au coût élevé des aménagements hydro-agricoles. La lenteur des progrès dans les petits aménagements et dans la gestion des eaux de pluies, initiés par les paysans, s'explique par l'absence du soutien de l'État. Ces petits aménagements constitueraient pourtant une alternative pertinente alors que les grands aménagements sont beaucoup plus coûteux et ne peuvent être mis en place faute de ressources suffisantes.

Les petits aménagements sont surtout organisés grâce à l'action des ONG, notamment suite aux deux grandes sécheresses de 1974-75 et 1984-85. Pour améliorer la productivité, les paysans ont recours aux techniques d'amendement des terres (utilisation d'engrais et d'irrigation). Or, ils n'ont pas accès aux engrais et même si ceux-ci sont subventionnés par

l'État ou les ONGs, le faible taux d'alphabétisation (en moyenne 22 % dans la majorité des cas) fait que ces paysans ne sont soit pas du tout ou soit mal informés des problématiques quant à leur usage adéquat. Ainsi, une mauvaise application cause souvent des problèmes écologiques et sanitaires encore plus importants, notamment l'accumulation de polluants chimiques (nitrates et métaux lourds). Ces derniers sont drainés par les eaux de ruissellement vers les cours d'eau provoquant ainsi l'eutrophisation et la contamination des cours d'eaux. Le seul engrais accessible est bien souvent le fumier dont l'épandage est pratiqué sur les parcelles proches des villages, et non sur les champs de brousse qui se trouvent plus éloignés. Les paysans utilisent plusieurs méthodes traditionnelles pour améliorer la productivité agricole, soit la jachère, le Zaï et l'association de cultures.

a) Le système de jachère

Le système de jachère est une pratique universelle des agriculteurs également utilisée dans les pays sahéliens. Elle consiste à la mise en valeur des terres, nouvellement acquises par les paysans, durant 2 à 3 années de culture. Le champ est par la suite abandonné lorsque les rendements deviennent dérisoires. Ces champs sans culture pendant une période plus ou moins longue sont colonisés par une végétation spontanée appelée jachère (Voisins mondiaux, 1997). Compte tenu de la fragilité (sensibilité à l'érosion, faible teneur en azote) qui caractérise la structure de plusieurs sols au Sahel, la pratique des jachères permet au terrain de préserver sa fertilité et de reconstituer en même temps ses éléments nutritifs en vue de sa nouvelle mise en culture. La durée de la période de repos s'étend de une à plusieurs années. Cette durée dépend des cultures pratiquées auparavant sur la parcelle (types de rotation) et des techniques agronomiques adoptées (apport de fumier et autres engrais). Ce système, qui était à la base de la production alimentaire des populations, ne répond plus à la nouvelle réalité de l'environnement actuel, en raison notamment de la détérioration récente du régime des précipitations et du fort accroissement démographique. Ainsi, la période de jachère qui s'étendait sur 3 à 10 ans tend à disparaître à cause de la rareté des terres cultivables. Les paysans ont souvent recours à d'autres techniques traditionnelles d'amélioration de la productivité telle que le Zaï.

b) Le Zaï

Au nord du Burkina Faso, dans la région du Yantenga, à cause de la baisse de la pluviométrie et de l'augmentation de la dégradation des sols, les paysans ont cherché des solutions pour augmenter la capacité productive de leurs sols en améliorant leur méthode de culture. Le Zaï, est une technique traditionnelle de préparation du sol qui consiste à faire des trous de 20 à 30 cm de diamètre et d'une profondeur de 10 à 15 cm un peu avant les premières pluies pour récupérer l'eau de ruissellement lorsque celles-ci surviennent. Ensuite on sème les graines de mil ou de sorgho afin de rendre moins sensibles les semis en cas de pluviosité irrégulière (Wright, 1982). Cette technique de conservation de l'humidité du sol se fait avec l'utilisation du compost comme fertilisant du sol. Lors d'une année de pluviométrie normale, les rendements de sorgho et de mil à partir du Zaï vont de 500 à 1000 kg/ha. La biomasse produite, servant de nourriture pour le bétail, varie de 2 à 4 tonnes de tiges de sorgho ou de mil par hectare. C'est donc une pratique adaptée au déficit hydrique de la zone sahélienne. Le Zaï est donc fortement encouragé par les partenaires au développement et s'inscrit dans le cadre des stratégies d'adaptation à la variabilité du climat.

c) Association des cultures

Les stratégies locales de production visent à réduire les risques en diversifiant les champs et les cultures et en minimisant les dépenses. L'association de plusieurs types de cultures² est une technique traditionnelle extensive de l'agriculture sahélienne, essentiellement destinée à l'autosuffisance alimentaire des populations locales. Elle consiste à cultiver sur un même terrain plusieurs cultures en même temps. Les associations les plus répandues sont celles qui comprennent les céréales et les légumineuses. Le niébé et l'arachide sont cultivées en association avec le mil ou le sorgho. Ce système d'association des cultures représente une meilleure gestion des ressources disponibles (terre et main d'œuvre), et minimise les risques de mauvaise récolte à la suite d'événements défavorables (d'ordre climatique ou biologique). Le mécanisme de fertilisation est connu : les légumineuses fixent

² Les principales cultures associées sont : sorgho, mil, maïs, riz, coton, niébé, arachide, pois d'Angole (Congo), haricots fonio, blé, sésame. La spécificité de cette méthode est qu'elle constitue un moyen pour les paysans de minimiser les risques de pénurie alimentaire, permettant ainsi de récolter les variétés hâtives parmi les différentes variétés de culture.

l'azote de l'air dont les céréales sont fortes consommatrices (Ap3a, 2001). Ces pratiques agricoles sont en voie d'amélioration, grâce aux efforts consentis par les différents pays et les institutions non gouvernementales. La formation des paysans aux techniques d'amélioration de la productivité des terres a eu des impacts appréciables sur la production alimentaire dans certaines provinces du bassin et hors du Burkina Faso.

4.1.2 Évolution de la production céréalière de 1984 à 2004

Les céréales constituent l'aliment de base des populations du Bassin de la Sirba. En dépit des efforts fournis pour l'amélioration de la productivité agricole, les rendements restent toujours décevants. La production céréalière moyenne par habitant est de 247 kilogrammes pour une superficie moyenne de 0,34 hectare. Ces valeurs ont connu une variation au cours des deux dernières décennies où la production moyenne par habitant était de 138 et 336 kilogrammes en 1984 et 1994 respectivement. Les données de l'annexe H renfermant les superficies totales, la superficie par habitant, production céréalière totale et par habitant et les superficies par habitant pour chacune des provinces ont servi à l'analyse de la variabilité de la production céréalière par habitant en lien avec l'évolution des indices moyens annuels (cf. Annexe D) durant la période 1984-2004. Une méthode de régression multiple a été appliquée sur les séries statistiques agricoles (production céréalière) et les indices pluviométriques par province, en considérant la production céréalière par habitant comme une variable dépendante et les indices pluviométriques comme les variables indépendantes explicatives les résultats sont présentés au tableau 4.1 et à la figure 4.1.

Tableau 4.1 Résultat d'analyse par régression : indices pluviométriques et production céréalière par habitant par province pour la période 1984-2004.

Provinces	Prédicteur	Beta	t	Sig.
Ganzourgou	Rank90	0,418	2,479	0,002
Gnagna	PrcTOT	0,459	2,253	0,036
Gourma	Pwj>90	0,224	2,157	0,005
Kollo	Prcpl	0,55	2,714	0,015
Sanmatengaa	PrcTOT	0,612	3,371	0,003
Say	Pwj>90	0,543	3,151	0,006
Séno	Max3d	0,359	2,210	0,004
Soum	Max3d	0,416	2,365	0,029

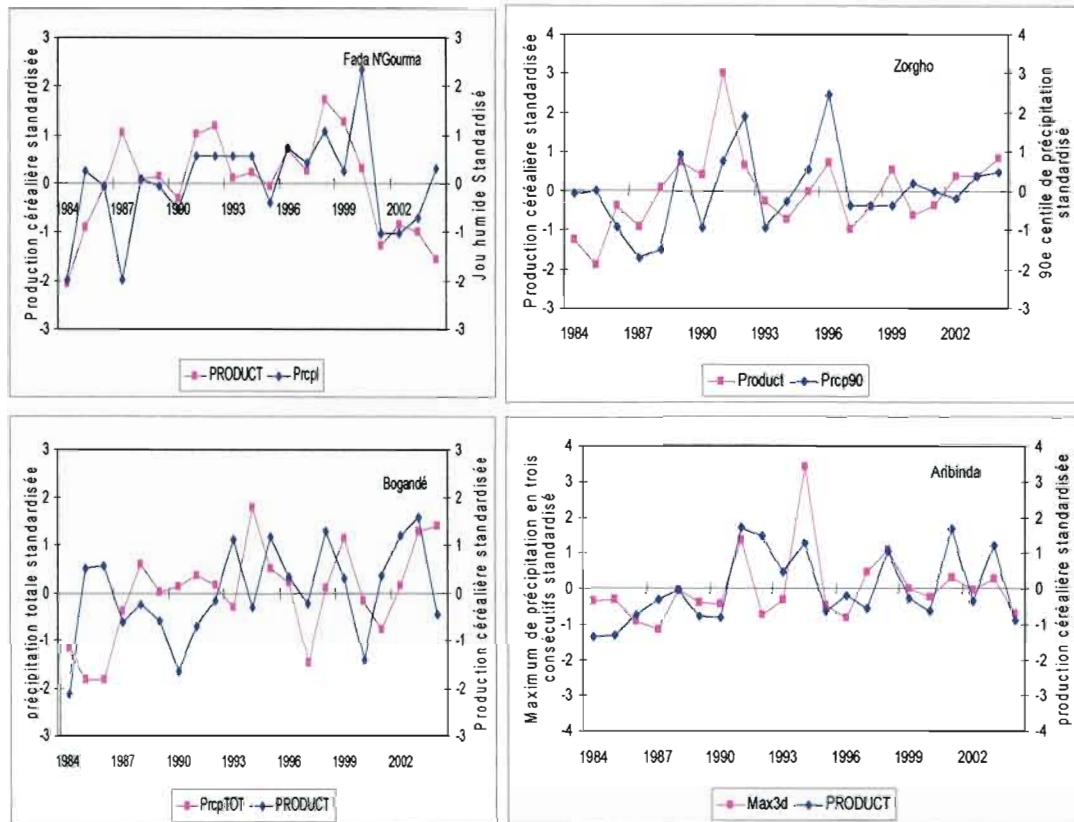


Figure 4.1 Anomalies standardisées par rapport à l'écart-type 1984-2004 des indices pluviométriques moyens mensuels (d'avril à octobre), et de la production agricole par habitant pour la période 1984-2004 pour les stations de Fada N'Gourma, Zorgho, Bogandé et Aribinda.

Les données du tableau 4.1 montrent que les valeurs de β des différents facteurs explicatifs ou composantes déterminantes du modèle prédictifs sont significatives à 95 %, suggérant un lien entre la variabilité de la production céréalière par habitant et certains indices pluviométriques. Comme indiqué au tableau 4.1 l'évolution de la production céréalière est sensible à la variabilité de certains indices pluviométriques soit l'occurrence des événements pluvieux, les indices d'extrêmes (maximum de pluie sur 3 jours consécutifs, 90^e centile de précipitation le nombre de jours de précipitations supérieure au 90^e centile), et la précipitation totale., le 90^e centile de précipitation explique 41 % de la variance de la production des céréales dans la province de Ganzourgou, tandis que le nombre de jour de précipitation supérieure au 90^e centile exprime 22 % et 55% de la variance de la production, dans la province de Gourma et le département de Say respectivement. Dans les provinces de

D'après la figure 4.1, la variation de la production céréalière semble relativement en phase avec celle des indices pluviométriques tels que le nombre de jours humides, le maximum de pluie en trois jours consécutifs le nombre de jours de précipitations supérieur au 90^e centile de précipitations. Cependant, les fluctuations avec les années sèches et humides sont moins évidentes avec notamment certaines années humides comme l'année 1994, et les années 2000 ne coïncident pas à une augmentation significative de la production. Aussi, le climat est l'un des facteurs prépondérants qui explique en partie la qualité d'une production agricole, mais pas uniquement. En effets, comme l'a montré l'étude de Seidou *et al*, (2006) au Niger, les facteurs autres d'origine non climatique comme par exemple la fertilité des sols et les modes de gestion des terres expliquent également la variabilité de la production agricole jusqu'à 35 % en moyenne.

4.1.3 Élevage

L'élevage est la seconde activité des populations du bassin après l'agriculture. Selon les résultats d'enquête sur le terrain, la totalité des cultivateurs dispose de poules, de chèvres et de moutons. L'élevage du gros bétail représente 25,3 % du cheptel contre 30 % pour le petit bétail et 26,4 % pour la volaille. Le cheptel est essentiellement composé de bovins, 25,7 %, ovins, 27,6 %, de caprin 46 %, d'équidé, de porc et de volaille. L'importance de cette activité dans l'économie des populations du bassin est liée à la commercialisation du bétail vers les grands centres du Burkina Faso et vers les pays côtiers. Le système d'élevage pur n'occupe que 5% de la population rurale, mais occupe plus de 58% de la superficie (CILSS, 2001), constituant un facteur de risque quant à la dégradation du couvert végétal. Cependant, l'élevage contribue à l'augmentation des revenus de toutes les personnes impliquées dans la chaîne de production et de commercialisation, de l'ordre de 25% du revenu familial (AP3A, 2001). Son rôle dans la sécurité alimentaire est plus manifeste dans les périodes de crise, car le bétail constitue le premier élément sur lequel les éleveurs et certains exploitants agricoles comptent pour l'apport immédiat de liquidité. La pratique à la fois des systèmes de production vivrière et de rente ainsi que de l'élevage des petits ruminants est surtout organisée dans le but d'assurer la sécurité alimentaire en cas de mauvaise récolte.

4.1.4 Autres activités

En dehors des activités citées précédemment, les populations exercent d'autres activités qualifiées de secondaires. En effet, confrontés à l'irrégularité de la production céréalière familiale et à la récurrence de la disette alimentaire, les ménages les plus exposés ont progressivement développé des stratégies d'adaptation et d'anticipation saisonnière, permettant de supprimer partiellement les aléas conjoncturels (Heyer, 1996; Reardon, 1997). Aussi, pour diversifier les sources de revenu, les populations utilisent essentiellement plusieurs stratégies telles que le maraîchage, le petit commerce, l'artisanat, l'apiculture et la pêche. Parmi ces activités, le petit commerce est celui qui est le plus répandu dans la population. Dans les sondages réalisés 69 % des personnes affirment vendre soit des produits agricoles, du dolo⁷, ou quelques autres produits manufacturés. L'artisanat qui est pratiqué à près de 29% se fait autour de la teinture, du tissage et de la poterie. Quant au maraîchage, à l'apiculture et à la pêche, elles sont spécifiques à certaines zones et sont très peu développées. Seulement 13% des populations les pratiquent pendant leur temps libre et en saison sèche. A ces activités, il faut ajouter la migration transitoire ou définitive d'actifs masculins vers les grands centres à la recherche de revenu.

4.1.5 Couverture des besoins alimentaires

Dans le bassin de la Sirba comme partout ailleurs au Burkina Faso et au Niger, la couverture des besoins alimentaires repose en grande partie sur la production vivrière (céréales sèches) ou l'élevage, c'est à dire sur des systèmes de production fortement dépendants des conditions climatiques de l'année et sur l'achat de denrées sur le marché. Dans l'ensemble, en l'absence de condition de sécheresse grave à court terme ou d'urgence sociale, le Burkina produit les céréales nécessaires à la sécurité alimentaire de sa population sans avoir recours à l'aide alimentaire internationale. Par exemple de 1996 à 2000, avec une précipitation près des normales, la couverture des besoins alimentaires des populations atteignait 89% au Niger, et 105% au Burkina Faso (CILSS, 2001). Ces chiffres suggèrent que ces pays sont quasi-autosuffisants, dissimulant toutefois des disparités régionales importantes avec des zones excédentaires en région soudanienne, et des zones déficitaires au nord du bassin.

⁷ Le dolo est le vin local fabriqué à base sorgho. C'est l'une des activités lucratives des femmes.

L'insécurité alimentaire survient surtout au niveau des villages et des ménages, celle-ci est une conséquence directe de la pauvreté rurale (PNUD, 2008). Ce phénomène touche principalement 51% de populations rurales vivant en dessous du seuil de pauvreté. L'élevage contribue à assurer une certaine sécurité alimentaire des populations. Selon une enquête par Savadogo (2004), sur le bassin de la Sirba, 70 % des ménages affirment avoir recours à la vente d'animaux domestiques pour assurer la subsistance du ménage. Cette «épargne sur pied» constitue, le principal recours en situation de pénurie transitoire, assurant près de 25% des achats totaux de céréales dans les départements de Say, Téra et Kollo au Niger et près de 35 % dans les provinces du Burkina Faso (Janin et Martin-Prével, 2003). Confrontés à l'irrégularité de la production céréalière familiale et à la récurrence de la disette alimentaire, les ménages les plus exposés ont progressivement développé des stratégies d'adaptation et d'anticipation saisonnière, permettant de supprimer partiellement les aléas conjoncturels (Matlon, 1975; Heyer, 1996; Reardon, 1997).

4.1.6 Vulnérabilité des activités agropastorales des populations face à la récurrence de la sécheresse

Cette sous-section fait la synthèse des informations collectées auprès des populations (sondage et enquête) sur le terrain en 2005. Elle se focalise principalement sur les enjeux liés à la variabilité saisonnière et interannuelle des précipitations et ses effets sur les activités économiques sur le bassin de la Sirba (cf. table 4.2). Le tableau 4.2 fait la synthèse du contexte local de la vulnérabilité des populations face à la variabilité des précipitations sur le bassin. D'après les paysans, le climat de type soudano-sahélien est le premier facteur de vulnérabilité des populations du bassin. L'absence de précipitation durant plus la moitié de l'année est un handicap au développement de l'agriculture pluviale, base essentielle de l'économie et qui assure la subsistance des populations. D'après le tableau 4.2, les enjeux identifiés par la population sont en rapport avec l'évolution des précipitations au cours de la saison humide, la pauvreté, l'endettement des paysans, l'insécurité alimentaire et la migration des bras valides et des ressources au cours de l'année notamment. Ceux-ci constituent des facteurs qui rehaussent la vulnérabilité des populations face à la variabilité du climat.

L'une des conséquences de la variabilité actuelle du climat est la persistance de la sécheresse qui prolonge la durée habituelle de la saison sèche. Ainsi, l'assèchement temporaire

des cours d'eau et l'arrêt de l'écoulement de la Sirba pendant une bonne partie de la période sèche, l'abaissement, du niveau des nappes phréatiques, le tarissement des puits traditionnels ont été exacerbés au cours des trois dernières décennies. Le début tardif de la saison humide et l'arrêt prématuré des pluies sont à la base des pertes de rendements. En plus, les paysans sont souvent confrontés à des problèmes d'endettement durant les périodes de soudure. Pour satisfaire les besoins vitaux de la famille, ils sont obligés de prendre des sacs de mil à crédit. Pour accéder à ces denrées, il faut que le paysan accepte de payer deux sacs de mille pour rembourser un sac pris à crédit. Ce processus instauré par les commerçants contribue au maintien d'une bonne partie la population sous le seuil de la pauvreté. Cependant plusieurs initiatives sont entreprises pour lutter contre ce fléau qui mine la capacité d'adaptation des populations face à la récurrence de la sécheresse.

Tableau 4.2 Synthèse des enjeux liés à la variabilité saisonnière, annuelle et interannuelle des précipitations et leurs impacts sur les activités agropastorales (sondage et enquête en 2005) sur le bassin de la Sirba.

Période	Enjeux	Conséquences
A. Variabilité annuelle De février à mai Période sèche	<u>Absence de pluie</u> : Assèchement des cours temporaire, abaissement du niveau des nappes phréatiques, tarissement des puits traditionnels, pollution des eaux de surface dessèchement des plantes	Pénurie d'eau Prolifération des maladies liées à l'eau Manque de nourriture pour les animaux
De juillet à septembre Période humide	<u>Variabilité des pluies</u> : début tardif ou arrêt prématuré des pluies. <u>Apparition de séquences sèches</u> : durant la période humide : Juin-juillet (deux semaines) Août-septembre (20 jours)	Perte de semences Diminution des rendements Perte de 20 % des rendements Perte totale des rendements
B. Variabilité interannuelle	Fréquence élevée de la récurrence de la sécheresse Dégradation graduelle de l'environnement	Aggravation de la pénurie d'eau Baisse des rendements agricoles Diminution de l'effectif du cheptel : pauvreté problème d'insécurité alimentaire, endettement des paysans, disettes, migrations

4.2 Bien-être social

Le bien être social constitue l'ensemble des dispositions prises par une société, en faveur de l'éducation, de la santé ou d'autres facteurs de bien-être qui accroissent la possibilité réelle de liberté substantielle qu'ont les individus de vivre mieux. Dans ce contexte, les facteurs de bien-être tels que la pauvreté, la scolarité, l'alphabétisation et la santé constituent dans notre zone d'étude des éléments importants de la vulnérabilité des populations.

4.2.1 Aspects sociodémographiques

Le bassin de la Sirba était une zone à faible densité de population jusqu'aux années 1980. Ensuite, la région a connu des flux d'immigrants de plus en plus importants, en partie en raison de sa pluviométrie moyenne relativement plus élevée que celle du plateau central et en raison des aménagements hydro-agricoles qui y ont été réalisés. La population est inégalement répartie sur l'ensemble du bassin, les plus fortes concentrations se rencontrant sur le plateau central, dans les provinces de Kouritenga et Ganzourgou ayant une densité moyenne de 112 et 75 hbt/ km². Les provinces de l'est, du sud et de l'ouest sont relativement peu peuplées, comme à Gourma, Gnagna et Say où la densité varie entre 23 et 26 h/km². La structure démographique par sexe et par âge révèle une prédominance des femmes, soit 51,1 % contre 48,9 % d'hommes. La structure par âge de la population se caractérise par sa jeunesse, les jeunes de moins de 15 ans représentent plus de 50 % de la population, tandis que les personnes âgées de 65 et plus ne représentent que 3.4 % (cf. tableau 4.3). Selon le recensement global de la population du Burkina Faso en 1996, le taux d'accroissement est estimé à 2,38 % par an (INSD, 2000) et ce taux varie selon les provinces

D'après le tableau 4.3, les provinces de Ganzourgou, Kouritnga, et Namentenga ont les taux les plus élevés d jeunes (0-14) en moyenne, tandis que les provinces de Seno et Kollo présentent les faibles taux soit 44 % en moyenne. Les adultes 47 % en moyenne sur l'ensemble du bassin de la Sirba constituent la population active, tandis que les jeunes et vieillards forment la classe des personnes en charge avec 52 % d la population totale. Ce qui signifie que chaque adulte a au mois une personne en charge.

Tableau 4.3 Structure par grand groupe d'âge de la population par province (Source : INSD, 2000)

Provinces	Jeunes	Adultes	Vieillards	Personnes /charge	Accroissement/ Population en 2004
	0-4ans	15-64 ans	65 ans et plus	0-14 et 65ans et plus	
Ganzourgou	50,6	47	2,2	52,8	2,5
Gnagna	49,4	47	3,4	52,8	2,7
Gourma	47,9	47	5,6	53,5	2,2
Kolo	44,4	48	8,0	52,4	3,4
Kouritenga	50,0	46	3,9	54,0	2,1
Namentenga	50,9	48	1,3	52,2	2,2
Sanmatenga	47,0	51	2,0	49,0	2,1
Say	45,4	47	7,6	53,0	3,4
Séno	44,1	49	6,8	50,9	2,7
Soum	46,6	46	7,2	53,8	2,8
Téra	47,0	49	4,0	51,0	3,4

Comme suggéré précédemment, les mouvements migratoires sont positifs dans la zone et concerne les ménages à la recherche de conditions plus favorables pour les activités agropastorales des populations. Cependant, les jeunes constituant les bras valides de la communauté cherchent avant tout à émigrer dans les centres urbains à la recherche d'emplois plus rémunérateurs. Ceci représente ainsi un handicap pour le développement économique du bassin.

4.2.2 Pauvreté

Le terme pauvreté recouvre de nombreux éléments autres que le revenu monétaire d'un individu, tels que son aptitude à jouer un rôle actif au sein de sa communauté ou sa capacité à prendre lui-même en main sa propre existence et de profiter des opportunités variées qui lui sont offertes pour vivre décemment. D'où la nécessité de prendre en compte d'autres aspects que le revenu tels que les niveaux d'éducation, de santé, de nutrition, et d'accès au logement, à l'eau potable, à la terre, à l'information, etc. À ces aspects s'ajoutent d'une part, le statut de l'individu lui-même caractérisé par les phénomènes de marginalisation et d'exclusion sociale et, d'autre part, le manque de capital social représenté par l'absence de pouvoir de décision, de relations et de liens sociaux. Dans le cas du Burkina Faso, outre ces caractéristiques, l'échange inégal et les subventions agricoles accordées dans les pays riches constituent des causes systémiques de la pauvreté, dues à l'intégration de l'économie Burkinabé à l'économie

mondiale. Celle-ci crée des manques à gagner régulier notamment aux producteurs Burkinabé et participe à l'aggravation de la pauvreté (MED, 2003).

La pauvreté notamment économique se traduit au niveau individuel par la non satisfaction des besoins essentiels tels que l'alimentation et l'habillement. Au niveau collectif, elle se traduit plutôt par l'absence de facteurs naturels favorables, la famine et les situations d'épidémies. En outre, l'absence d'un environnement sécurisant (sécurité publique), le manque d'infrastructures socio-économiques (écoles, marchés, dispensaires, les problèmes d'hygiène etc.), l'enclavement de certaines zones et la faiblesse des moyens de transport accentuent cette notion de pauvreté collective ressentie par les populations.

Le seuil absolu de pauvreté se situait à 41 099 F CFA/an en 1994 et à 72 690 F CFA/an (145,38 \$) en 1998. En 2003, elle a atteint 82 672 F CFA soit 200 \$ par adulte par an. Sur cette base, la proportion de la population vivant en dessous du seuil de pauvreté s'établit à 46,4% soit une hausse de 1,9 points comparativement à 1994 (44,5%) et de 1,1 point par rapport à 1998 (45,3%). Dans le bassin de la Sirba, ce pourcentage varie selon les provinces. Ce seuil atteint respectivement de 55 %, à 58,6 % en 2003 dans les provinces de Kouritenga et Ganzourgou. Les provinces de Gourma Gnagna Séno et Soum ont un taux moyen de 40 % alors que les provinces de Sanmatenga et Namentenga et Say ont un taux nettement inférieur à la moyenne nationale soit 34 à 38 % contre 46 % en moyenne (MED, 2003). Selon les résultats d'analyse des enquêtes de 1998, et de 2003, les disparités régionales s'expliquaient par les fortes différences dans la disponibilité des ressources naturelles comme l'eau, et les terres fertiles. En outre, la forte pression démographique conjuguée à un écosystème très défavorable rend cruciale la question de la pauvreté dans certaines zones. Le tableau 4.4 récapitule les principaux indices sociaux du bassin.

4.2.3 Éducation

Le Burkina Faso figure toujours parmi les pays où la situation de l'éducation reste encore préoccupante. Le taux brut de scolarisation au primaire qui était de 41% en 1999 est de 44,1% à la rentrée scolaire 2002/2003 tandis que le taux d'alphabétisation est passé de 18,4% à 21,8%. Près de 56% des enfants d'âge scolaire sont encore exclus du système en 2003.

Toutefois, il existe des différences selon le milieu de résidence, le sexe et la région administrative. D'après les données du tableau 3.20, le taux de scolarité sur le bassin de la Sirba varie de 31 % dans les provinces de Gnagna et Séno à 46,4 % dans celle de Ganzourgou. Le taux de scolarité des garçons est de 55 % en 2003 contre 45 % pour les filles. Le taux d'alphabétisation est également inégalement réparti selon le genre et le milieu de résidence. Les résultats de l'enquête du Burkina Faso sur les conditions de vie des ménages indiquent que le taux d'alphabétisation des pauvres est deux fois inférieur à la moyenne nationale et quatre fois inférieur à celui des riches qui est de 42,1%. Par rapport au sexe, l'enquête sur la pauvreté (MED, 2003) note que les hommes ont amélioré leur taux d'alphabétisation de 6 points entre 1994 et 2003, en passant de 16 % à 22 % alors que les femmes n'ont gagné que 1,1 point en passant de 11,4 % à 12,5 %. Au niveau du bassin de la Sirba ce taux pour les femmes est de 16 % tandis que celui des hommes a atteint 22 % en 2003. Cette faiblesse du taux de scolarité ou d'alphabétisation est en général, tout genre confondu un handicap majeur au développement économique du bassin.

4.2.4 Santé

Les résultats de l'enquête burkinabè sur les conditions de vie des ménages réalisées en 2003 (MED, 2003) permettent d'apprécier la situation sanitaire notamment le taux de morbidité global, le taux de consultation, le retard de croissance des enfants, l'insuffisance pondérale et l'émaciation. L'analyse de l'ensemble de ces indicateurs montrent que la situation sanitaire est loin d'être encourageante. Le taux de morbidité global qui mesure l'état général de santé est de 5,8% en 2003 au niveau national. Ce taux est plus élevé dans les provinces de Ganzourgou (8,3%), de Kouritenga (7,3%). Les taux les plus faibles sont enregistrés dans les provinces de Sanmatenga et Namentenga (3,9%), ainsi que celles de Gangna, Gourma, Soum et Séno (4%). Le taux de consultations dans les centres de santé primaire au niveau des provinces sont compris entre 6,6% pour la province de Ganzourgou et 3,7% pour les autres provinces. L'enquête indique que 44,5% des enfants burkinabè souffrent d'un retard de croissance dû à la malnutrition. Cette malnutrition touche davantage les enfants du milieu rural (46,8%) que ceux du milieu urbain (29,7%). Ce sont les régions de l'Est (59,9%) et du Plateau Central (52,2%) qui sont le plus concernées par le retard de

croissance. L'insuffisance pondérale, qui touche 42,2% des enfants du Burkina Faso, est plus forte en milieu rural (50% des enfants de l'Est et du Centre-Est).

D'après l'analyse du tableau 4.4, la couverture en Centre de soins de santé primaire est très faible. Elle varie de 4 à 10 % pour la plupart des provinces du bassin situées dans la partie burkinabé et peut atteindre jusqu'à 47 % dans le département de Téra au Niger. Les services de soin de santé primaire sont particulièrement peu utilisés par les pauvres et les populations vulnérables. Seuls les 20% les plus riches présentent un niveau d'utilisation des services satisfaisant (MED, 2003). Les enfants en zone rurale sont moins vaccinés que les enfants en zone urbaine. Ces indicateurs (cf. tableau 4.4) expriment selon le cas la vulnérabilité des populations. Par exemple un fort pourcentage de personnes vivant en dessous du seuil de la pauvreté et/ou une faible proportion de la population ayant accès aux soins de santé est un facteur de vulnérabilité.

4.2.5 Infrastructures hydrauliques

Les résultats d'analyse des données d'inventaire des points d'eau indiquent que les populations du bassin de la Sirba s'approvisionnent en eau de consommation à partir des forages, des puits modernes, et des puits traditionnels, et, à défaut, des eaux de surface (cours d'eau). Cependant, les cultures sont essentiellement alimentées par les eaux de pluie (97%).

Tableau 4.4 Indices sociaux (Source : MED 2003).

Provinces	Pauvreté	Scolarité	Couverture en eau potable (%)	Couverture en santé primaire (CSP)
Ganzourgou	58,6	46,4	86,0	3,2
Gnagna	40,9	30,9	59,2	3,8
Gourma	40,9	44,5	76,0	4,8
Kouritenga	55,1	56,2	90,6	4,2
Namentenga	34	36,3	84,3	4,5
Sanmatenga	34	47,7	16,8	9,1
Séno	41,3	31,2	32,4	6,7
Soum	41,3	36,1	47,7	5,0
Kolo	38	50,3	52,0	47,0
Say	56	44	50,0	20,0
Téra	61	36,3	36,0	47,0
Moyenne	45,6	41,8	57,0	14,1

Les villages du bassin versant de la Sirba ont bénéficié d'importants programmes de puits dans les années 1970, ce qui explique le nombre élevé (1493) de ce type d'ouvrage. Malheureusement, une des conséquences de la détérioration du régime des précipitations a été et est encore la diminution continue des niveaux piézométriques avec pour conséquence l'assèchement des puits. Ainsi, 800 de ces puits sont devenus tarissables au cours de la décennie 1980 (Savado, 2004). C'est pourquoi, les forages ont pris le dessus sur les puits à grand diamètre. Les puits sont mieux adaptés pour assurer sur une courte période de temps l'abreuvement du cheptel de bœufs et autres caprins. Ils présentent en plus l'avantage sur les forages de ne nécessiter pour les usagers que de très faibles frais d'entretien. Contrairement aux forages, ils autorisent en plus l'utilisation simultanée de plusieurs acteurs à la fois. Le tableau 4.5 fournit la situation des points d'eau dans la vallée de la Sirba en 2004, alors que la figure 4.2 permet d'évaluer l'évolution du nombre de points d'eau dans cette même région de 1947-2004.

D'après le tableau 4.5, 70 % des forages sont fonctionnels. Le taux d'utilisation des forages est plus important que celui des puits. Les forages équipés à motricité humaine représentent 64 % des points d'eau inventoriés suivi des puits tarissables (25 %) et des puits modernes pérennes (11 %), avec un taux de fonctionnement satisfaisant dans l'ensemble du bassin 97 %, 78 % et 99 % respectivement. Comme indiqué dans le tableau 4.5, l'eau des forages est utilisée à 97 %, pour les besoins domestiques, contre 63,4 % pour les puits modernes et 55,7 % pour les puits tarissables. Ceci est un signe d'amélioration de la disponibilité d'eau potable pour les ménages.

Tableau 4.5 Situation des points d'eau sur le bassin de la Sirba en 2004. (Source Direction Générale de l'inventaire des ressources hydrauliques, 2004).

Type	Nbre	Fonctionnalité	Motricité humaine	Utilisation			Fréquentation
				Domestique	Agricole	Pastorale	
Forages	1733	70	64	97,6	1,1	1,3	75
Puits modernes	647	80	25	63,4	17,7	18,9	65
Puits traditionnels	1493	50	11	55,7	14,7	30,6	55

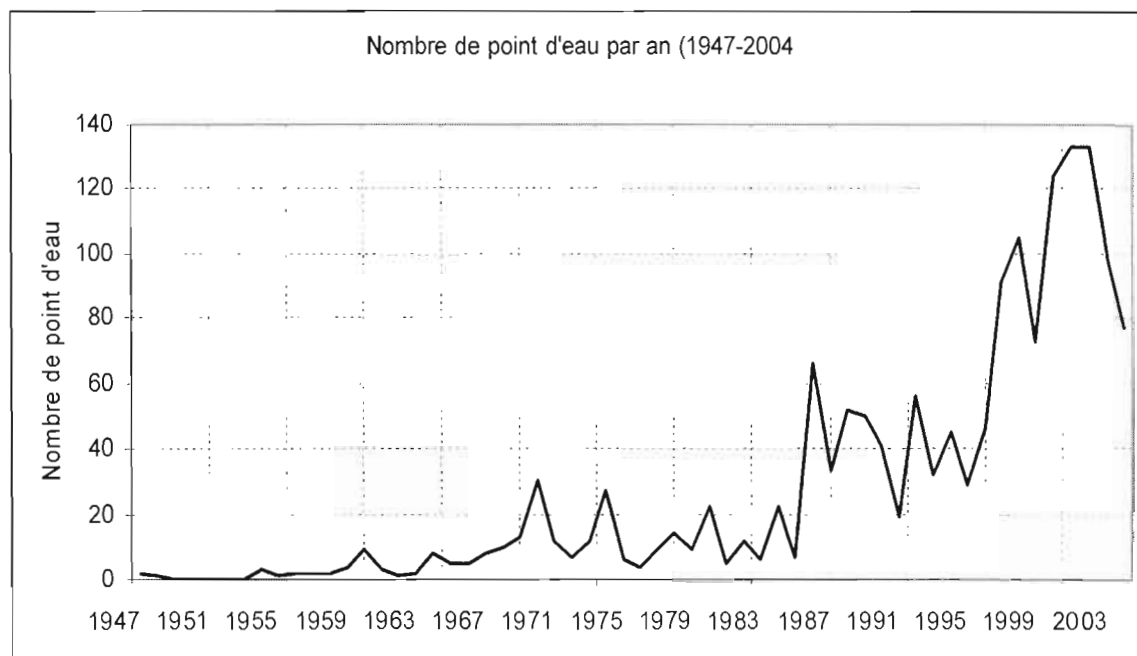


Figure 4.2 Évolution des installations de forages dans le bassin de la Sirba (Source : Base de données AGRHYMET : Inventaire des points d'eau 2004)

L'utilisation agricole et pastorale de l'eau des forages est toutefois très faible, soit 1,1 et 1,3 % respectivement tandis que les puits modernes et tarissables ont un taux d'utilisation de 35 à 45 %. Par ailleurs, l'implantation des forages sur le bassin a augmenté de façon significative entre 1978 et 1987 (cf. figure 4.2), notamment dans le contexte de la persistance de la sécheresse (1970-1980), comme suggéré précédemment, qui a débuté depuis la fin des années 1960. Cette implantation a connu un ralentissement vers la fin des années 1988 à 1994, puis à nouveau une nouvelle progression dans les années 2004. Cette augmentation du nombre d'infrastructures hydrauliques a amélioré l'accès à l'eau potable par une bonne partie de la population.

a) Besoins en eau de la population et capacité d'approvisionnement

Les demandes en eau dans le bassin concernent essentiellement les besoins domestiques, souvent limités à la boisson, la cuisson des aliments, la lessive, l'irrigation des cultures, l'abreuvement du cheptel et la pêche. La demande en eau potable de la population est pourvue essentiellement par des ressources d'eau souterraines à travers les forages et les

puits que ce soit en milieu rural ou en milieu urbain. En 2004, le bassin versant de la Sirba disposait dans ce cadre de 1 733 forages et 647 puits modernes. (cf. tableaux 4.6 et 4.7).

La politique d'approvisionnement en eau potable du Burkina Faso est axée sur deux critères : la taille des collectivités, leurs capacités techniques et financières. L'approvisionnement en eau potable des centres semi-urbains ou centres secondaires vise la satisfaction de la demande en eau pour les centres dont la population est supérieure à 2 000 habitants. L'hydraulique villageoise vise avant tout la satisfaction de la demande en eau pour les besoins du monde rural dont la population est inférieure à 2 000 habitants. Le tableau 4.6 indique que les besoins en eau dépassent très souvent la disponibilité. Les forages sont moins sollicités en saison humide, tandis qu'ils restent la principale source d'eau potable en saison sèche. Pour satisfaire les besoins en eau potable des populations, le Burkina Faso investit près de 10% de son budget dans la réalisation d'infrastructures hydrauliques (MED, 2003). A cela, il faut ajouter l'action de diverses ONGs, et autres associations. Comme mentionné précédemment, ces réalisations sont axées sur les puits modernes et les forages.

Tableau 4.6 Besoins en eau pour la population et le cheptel par province en 2004 (Source : AGHRYMET)

Provinces	Besoin en eau (million m ³)				Disponibilité	
	Humain	Bovin	Ovin	Caprin	Forages	Retenues (million m ³)
Ganzourgou	16,0	33,7	33,7	33,7	33,7	1,9
Gnagna	33,7	19,6	19,6	19,6	19,6	6571,6
Gourma	19,6	29,1	29,1	29,1	29,1	0,6
Kolo	1,4	3,4	3,4	3,4	3,4	0,3
Kouritenga	29,1	19,9	19,9	19,9	19,9	96,7
Namentenga	19,9	52,9	52,9	52,9	52,9	200,8
Say	3,4	8,7	8,7	8,7	8,7	0,2
Sanmatenga	52,9	22,1	22,1	22,1	22,1	103,9
Séno	22,1	40,8	40,8	40,8	40,8	6,9
Soum	40,8	1,4	1,4	1,4	1,4	29,8
Tera	8,7	247,8	247,8	247,8	247,8	0,03
Total	247,8	479,6	479,6	479,6	479,6	7012,7

D'après Savadogo (2004) il n'existe pas actuellement un suivi structuré de la demande en eau au niveau national. La norme internationale admet une quantité minimale de 10 à 20 litres d'eau potable par habitant et par jour (OMS, 2007). La situation en matière d'approvisionnement en eau potable du bassin s'améliore en terme de couverture des besoins, due notamment aux efforts consentis en matière d'équipements hydrauliques du gouvernement du Burkina Faso et du Niger (tableau 4.7).

D'après le tableau 4.7, le taux moyen de couverture des besoins en eau en 2004 sur le bassin est de 57 %. Cette moyenne présente de larges disparités entre les différentes provinces. Les forts pourcentages de population ayant accès à l'eau se retrouvent dans les provinces de Kouritenga (96,4%), Namentenga et de Séno (84, 5%), tandis que les provinces de Sanmatenga, et Soum et Téra présentent les plus faibles taux de couverture des besoins en eau potable. La production des points d'eau modernes est fortement dépendante de la période, c'est à dire de la disponibilité de l'eau dans les forages et les puits (Savadogo, 2004). Le temps d'exploitation moyen journalier d'un forage dans la zone est de 10 heures. 198,44 m³ une journée.

Tableau 4.7 Couverture en infrastructures hydrauliques et couverture en eau potable des populations du bassin de la Sirba par province en 2004. (Source : Direction Générale de l'Inventaire des ressources Hydrauliques, Ouagadougou Burkina Faso DGIRH)

Provinces	Population	Nombre Forage	Besoins	Déficit	Couverture en eau potable (%)
Ganzourgou	53355	106	178	72	86,0
Gnagna	112416	219	375	156	59,2
Gourma	65480	135	218	83	76,0
Kouritenga	97043	313	323	10	90,6
Namentenga	66437	191	221	30	84,3
Sanmatenga	176191	273	587	314	16,8
Séno	73814	208	246	38	32,4
Soum	136140	213	454	241	47,7
Kolo	4673	12	16	4	52
Say	11453	21	38	17	50
Téra	29058	42	97	55	36
Moyenne	855118	157,5	250,3	92,7	57

b) Accessibilité des points d'eau

Les résultats de cette enquête concernent la disponibilité, l'accessibilité, la qualité, l'environnement et le coût de l'eau par ménage. D'après les résultats de notre enquête sur le terrain, la politique en matière d'eau potable en milieu semi urbain est d'assurer la viabilité du service de l'eau en utilisant des solutions adaptées aux besoins de la localité et de la capacité des habitants d'assurer la gestion du système tout en assurant le respect d'une norme de 30 litres par jour et par habitant. Cette valeur est au-dessus du minimum fixé par l'OMS, qui est de 10 à 20 litres par habitant par jour. En milieu rural, la première priorité de la politique du Burkina en matière d'eau potable est que chaque village dispose d'un point d'eau moderne (forage équipé de pompes ou puits modernes).

Les normes retenues pour les zones rurales ont été définies par la capacité d'approvisionnement d'un puits doté d'une pompe manuelle par tranche de 300 à 500 habitants, avec une distance maximale de portage de 300 m. Cependant, la structure de l'habitat (dispersé) fait que ce chiffre n'est jamais atteint. Certaines localités soit environ 75% des villages ont une population inférieure à 1 000 habitants dont 30 % ont moins de 500 personnes. Par conséquent, la distance parcourue pour accéder à un point d'eau potable peut facilement atteindre 1 à 2 km (cf. tableau 4.8). Pour mieux appréhender les problèmes de l'accès à l'eau potable, nous avons réalisé une enquête auprès des femmes dans les localités de Boulsa (Nianga), Piela (Nindialarou) et à Bogandé. D'après le tableau 4.8, l'eau est accessible dans un rayon de 0,5 à 2 km selon les saisons et coûte 1 500 F CFA par ménage. Par contre l'eau des pompes est plus chère : 10 FCFA/20 litres. Ce montant sert le plus souvent à l'entretien des infrastructures hydrauliques.

Certaines communautés ont instauré des taxes au prélèvement d'eau, un seau est taxé à 5 FCFA et un fût de 200 litres à 100 FCFA (Baldé, 2005). Un autre mécanisme consiste en un versement mensuel par chaque famille d'une somme de 150 FCFA pour l'entretien des équipements hydrauliques. L'une des sanctions observées en cas de non paiement de cette taxe est l'interdiction d'accès à la famille à la source d'eau potable.

Tableau 4.8 Accessibilité à l'eau potable dans les villages de Namentenga, Gnagna et Say en 2005
Source : enquête de terrain, du 12/10 au 30/10/2005

<i>Caractéristiques</i>	<i>Forage</i>	<i>Pompe</i>	<i>Puits traditionnels</i>	<i>Eau de surface</i>
Disponibilité	Faible	Faible	Moyenne	Faible
Accessibilité	0,5 à 2 km	0,5 à 2 km	0,2 à 0,5 km	0,5 à 5 km
Qualité de l'eau	Bonne	Bonne	Polluée	Polluée
Utilisation de l'eau	Domestique	Domestique	Domestique/élevage	Maraîchage/élevage
Coût / CFA	1500/ménage/an	10/20 litres	Gratuite	Gratuite
Environnement des points d'eau	Aménagé	Aménagé	Non aménagé/insalubre	Dégradé

c) Couverture en eau des cultures et du cheptel

L'agriculture pluviale est la pratique agricole la plus dominante sur le bassin, comme partout ailleurs dans la zone sahélienne et le calendrier agricole suit le rythme des pluies. L'agriculture irriguée occupe moins de 5 % des terres cultivables, et ce malgré la disponibilité d'un nombre impressionnant de barrages et de retenues d'eau. L'irrigation pratiquée concerne essentiellement les cultures du riz, le maraîchage et les cultures de contre saison. Celles-ci sont arrosées à partir des puits peu profonds creusés à l'intérieur des jardins ou à partir des eaux des barrages. L'alimentation en eau du cheptel se fait le plus souvent via les eaux de surface. Il ne nécessite que la conduite des troupeaux aux points d'eau et est de loin préféré par les éleveurs par rapport à l'exploitation des eaux souterraines. Après le tarissement des cours d'eau et des mares naturelles, une grande partie des troupeaux est alors obligée de partir vers les eaux permanentes. Les eaux souterraines destinées au bétail sont surtout exploitées par les puisards creusés dans le lit des cours d'eau temporaires et par les puits à grand diamètre. Leur usage est donc limité. Ces eaux servent essentiellement au cheptel domestique comme les ovins, caprins et les vaches laitières. C'est surtout en saison sèche que le ravitaillement en eau des troupeaux est le plus délicat. Les troupeaux se déplacent à la recherche d'eau, ce qui entraîne de nouveau des problèmes de surpâturage et de dégradation de l'environnement dans les zones d'accueil (cf. figures 4.3 et 4.4 et 4.5).



Figure 4.3 Infrastructure hydraulique pour l'approvisionnement en eau potable (Source : Enquête de terrain, 12/10/2005).



Figure 4.4 Rizière sur la plaine de la Sirba à Piela (Source : enquête de terrain, 12/10/2005).



Figure 4.5 Utilisation multiple de l'eau : Rizière à Nianga barrage abreuvoir du cheptel (Source : enquête de terrain, 12/10/2005).

Conclusion

La variabilité des indices pluviométriques explique en partie (40% en moyenne) la variabilité de la production céréalière sur la période 1984-2004. Car la production céréalière n'affiche pas une augmentation durant certaines années humides. Les aspects sociaux sont dominés par une croissance démographique galopante avec plus de 50 % de personnes en charge. Le seuil de pauvreté a connu une augmentation de 1,9 % entre les années 1994 et 2003. Alors que plus de 40 % des enfants en âge de scolarité n'ont pas accès à l'école et le taux de couverture en centre de santé primaire n'atteint pas 30 % pour la majorité des provinces. Cependant, des progrès sensibles ont été réalisés dans les domaines de des infrastructures hydrauliques agricoles et domestiques avec un taux moyen d'accès à l'eau potable de 57 % en moyenne. En dépit de ces efforts, la population reste toujours vulnérable face à la variabilité des pluies qui constitue la principale cause de perte des rendements agricoles et par conséquent de l'insécurité alimentaire.

CHAPITRE V

DÉVELOPPEMENT ET ANALYSE DES CRITÈRES DE VULNÉRABILITÉ

Ce chapitre est consacré aux résultats des différentes étapes menant au développement et à l'analyse des critères de vulnérabilité des populations du bassin de la Sirba. Il commence par l'interprétation de la corrélation spatiale entre les indicateurs de vulnérabilité pour ensuite présenter les résultats de l'analyse en composantes principales qui ont conduit à la détermination des critères, leur interprétation et leur analyse dans le temps et dans l'espace. La discussion et la conclusion sont ensuite présentées.

5.1 Résultats d'analyse des données par la corrélation non paramétrique de Spearman

Cette section est consacrée aux résultats du regroupement des différents indicateurs selon les cinq dimensions identifiées à la section 2.2.4 du chapitre 2. Cette opération a conduit à l'épuration de la matrice de données, en regroupant les indices les plus significativement corrélés et à éliminer ceux qui présentent les faibles taux de corrélation (cf. tableau 5.1) La corrélation a permis également d'établir des liens de dépendance ou d'association entre les différents regroupements possibles soit entre les indices climatiques, environnementaux, économiques, sociaux et de disponibilité en infrastructures sociales (cf. figures 5.1, 5.2 et 5.3).

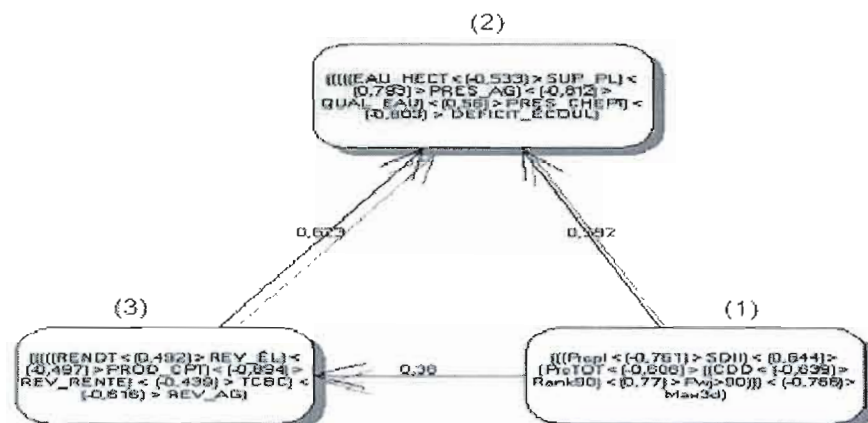


Figure 5.1 Corrélation non paramétrique de Spearman entre les indices des dimensions climatiques (1), environnementales (2) et économiques (3) au seuil de 95 % en 1984.

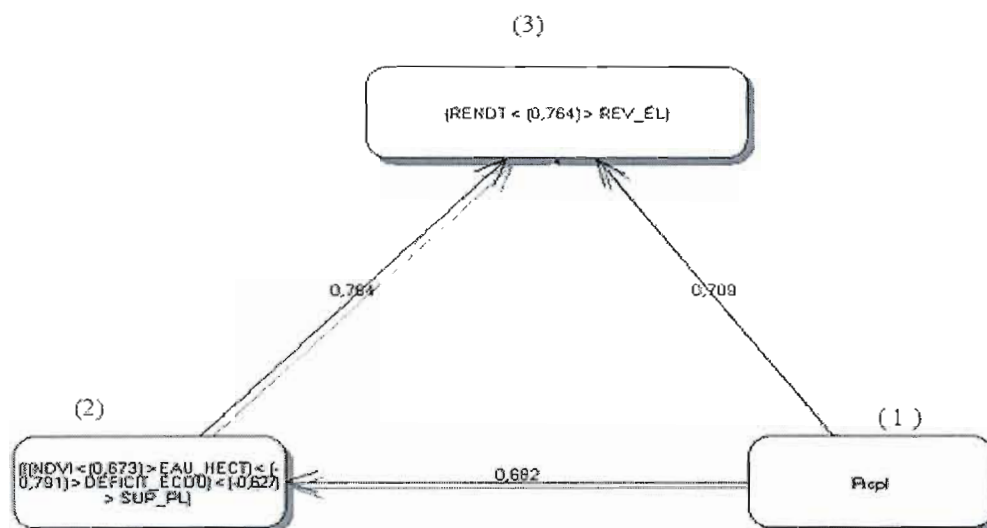


Figure 5.2 Idem à la figure 5.1 mais en 1994.

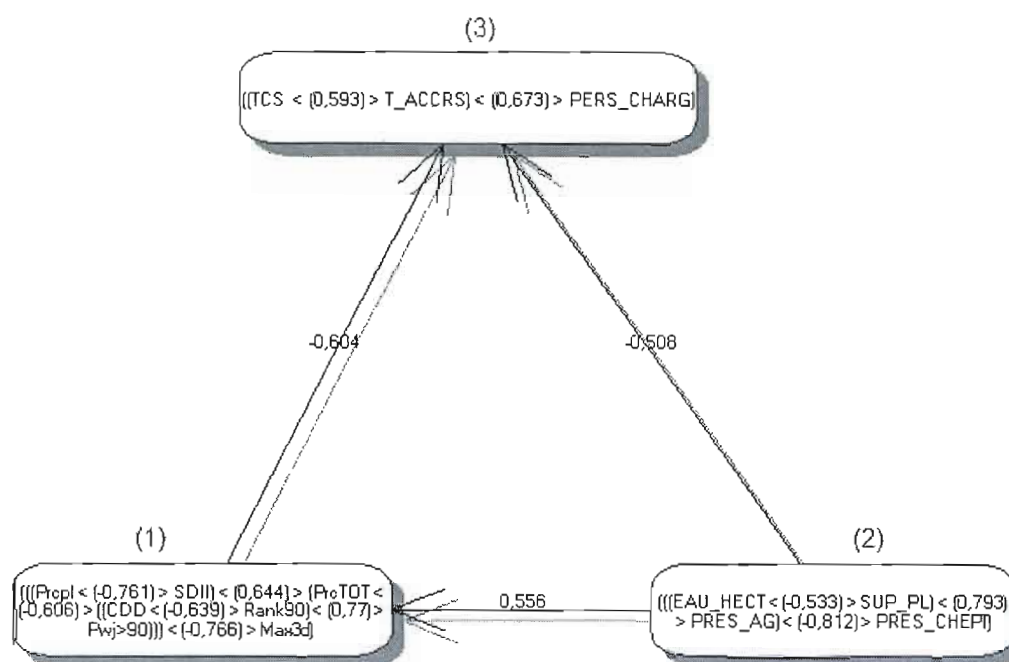


Figure 5.3 Idem à la figure 5.1 mais en 2004.

Chaque dimension représente un regroupement d'indicateurs inter-reliés par des corrélations significatives (au seuil de 95 %) et chaque regroupement représente un indice. Les flèches relient les dimensions qui sont significativement corrélées. Les chiffres entre parenthèse représentent les valeurs de corrélation entre les indicateurs et dans chaque dimension (cf. tableau 2.10).

Les figures 5.1, 5.2 et 5.3 illustrent les corrélations internes entre indicateurs et externe entre les dimensions : climat (1), environnement (2), et économie (3). Chaque dimension est constituée d'un ou de plusieurs indicateurs qui sont liés par des corrélations significatives. En considérant par exemple la composante climatique (2), le pourcentage de jours humides (PrcpI) est négativement corrélé ($P < 0,005$) à l'intensité de précipitation (SDII).

Ce qui signifie que plus le nombre de jours humide augmente, plus l'intensité ne diminue. La corrélation négative entre la précipitation totale (PrpTOT) et le maximum de jours consécutifs indique que la diminution des précipitations sur le bassin est surtout liée à la

fréquence des séquences sèches (cf. section 3.2.1 du chapitre 3). D'après la figure 5.1, la corrélation entre les indicateurs environnementaux (2) signifie que plus la pression agropastorale augmente sur le territoire, plus la qualité et la quantité de l'eau se détériorent (cf. figure 5.2) dans le contexte local de la variabilité climatique, plus les superficies cultivables augmentent moins il aura d'eau pour les alimenter et. La corrélation entre les indicateurs économiques, signifie que plus le revenu d'élevage augmente plus la production agricole diminue.

Cette opération a conduit à la réduction de la redondance des informations. Seuls les indicateurs significativement corrélés au seuil de 95 % ont été retenus et regroupés. Chaque groupe d'indicateurs a été considéré comme un indice synthétique. Cependant, certains indicateurs qui n'ont pas de corrélation interne significative sont également considérés comme indices et peuvent avoir des liens avec les autres dimensions, comme montré à la figure 5.2, où le pourcentage de jours humides a des liens de corrélation avec les autres dimensions.

Les figures 5.1, 5.2 et 5.3 illustrent l'existence de liens de corrélation entre les différentes dimensions définies à la section 2.2.4 du chapitre II. Ceci s'explique par la forte rétroaction entre le climat (précipitation) et les pratiques agricoles, la dépendance entre le climat et l'environnement, le lien direct entre la qualité de l'environnement et le système agropastoral ainsi que de l'effet direct des activités agricoles sur l'environnement. Les corrélations internes indiquent qu'il est possible de réduire le nombre de variables impliquées dans l'analyse, tandis que les liens externes montrent qu'il est possible d'avoir de meilleurs résumés par regroupement des indices statistiquement semblables, d'où la nécessité de réaliser une analyse en composantes principales. Le tableau 5.1 dresse le bilan des indices retenus pour l'ACP.

D'après le tableau 5.1, la première colonne contient les cinq dimensions de la vulnérabilité qui ont été préalablement identifiées et caractérisées (chapitre 3). Les trois autres colonnes renferment les différents indices retenus après épuration des matrices par la corrélation de Spearman. La composition des dimensions diffère selon les années. Les années 1984 et 2004 présentent les mêmes types d'indices en ce qui concerne les dimensions climat

environnement économie. Ces derniers ont été agrégés en un seul ou deux indices synthétiques pour chacune de ces dimensions (cf. figure 5.1). Tandis qu'en 1994, chacune de ces dimensions comporte trois à quatre indices synthétiques (Cf. figure 5.2). Cette différence dans la structure des données s'explique par le fait les paramètres environnementaux et économiques qui caractérisent la vulnérabilité des populations sont fortement liés au climat. Ors, comme suggéré au chapitre 3, les années 1984 et 2004 sont les pires années déficitaires au plan pluviométrique. D'où la similitude dans l'évolution spatiotemporelle des indices. Par contre l'année 1994, les facteurs climatiques ne s'exprimaient pas en terme quantitatif, mais qualitatif, tels que la durée de la saison et la fréquence des pluies utiles la durée maximale des séquences sèches. Chacun de ces aspects agit différemment sur les activités agricoles et les systèmes environnementaux. Les deux autres dimensions qui ne dépendent pas forcément des paramètres climatiques, présentent la même structure de données. Les matrices formées par l'ensemble retenus par province en 1984, 1994 et 2004 après réduction (i.e. tableaux 5.2., 5.3 et 5.4) ont servi à l'Analyse en Composantes Principales indices.

Tableau 5.1 Récapitulatif des indices retenus après réduction des matrices selon les années

Dimensions	Indices synthétiques ou indicateurs composites		
	1984	1994	2004
Climat	[Pourcentage de jours humides Prcpl, Intensité de précipitation (SDII), Précipitation totale (PrcTOT), Maximum de jours consécutifs secs (CDD), 90 ^e centile de précipitation (Rank90), Nombre de jour de pluie supérieure au 90 ^e centile (Pwj>90), Maximum de précipitation en trois jours consécutifs (Max3d)] CLIM.	Pourcentage de jours humides Prcpl [Précipitation totale (PrcTOT), 90 ^e centile de précipitation (Rank90), Nombre de jour de pluie supérieure au 90 ^e centile (Pwj>90)] (PrcTOT), Maximum de jours consécutifs secs (CDD), Maximum de précipitation en trois jours consécutifs (Max3d) (CLIM)	[Pourcentage de jours humides Prcpl, Intensité de précipitation (SDII), Précipitations totale (PrcTOT), Maximum de jours consécutifs secs (CDD), 90 ^e centile de précipitations (Rank90), Nombre de jour de pluie supérieure au 90 ^e centile (Pwj>90), Maximum de précipitation en trois jours consécutifs(Max3d)] CLIM)
Environnement	Indice de végétation (NDVI), [Quantité d'eau par hectare (EAU_HECT), Superficie des cultures pluviales (SUP_PL), Taux d'occupation des cultures par hectare (PRES_AG), Taux d'occupation par unité de bétail à l'hectare (PRES_CHEPT), Qualité de l'eau (QUAL_EAU)] (PRES_ANTH)	[Indice de végétation (NDVI), Qualité de l'eau (QUAL_EAU)] (ENVI) [Quantité d'eau par hectare, (EAU_HECT), Superficie des cultures pluviales (SUP_PL) Pression agricole (PRES_AG) Pression du cheptel (PRES_CH)] (PRES_ANTH)	Indice de végétation (NDVI), [Quantité d'eau par hectare (EAU_HECT) Superficie des cultures pluviales (SUP_PL) Taux d'occupation des cultures par hectare (PRES_AG), Taux d'occupation par unité de bétail à l'hectare (PRES_CHEPT), Qualité de l'eau (QUAL_EAU)] (PRES_ANTH)
Économie	[Rendement des cultures céréalières, Revenu perçu de la vente des produits d'élevage (REV_ÉL), Production par habitant (PROD_CPT), Revenu sur les cultures de rente REV_RENTE), Taux de couverture des besoins céréalier (TCBC), Revenu sur les cultures vivrières (REV_AG)] (ECONO)	Rendement des cultures céréalières (RENDT), Revenu sur les cultures vivrières REV_AG), Revenu perçu de la vente des produits d'élevage (REV_ÉL), Revenu sur les cultures de rente REV_RENTE (REV), Production par habitant (PROD_CPT), Taux de couverture des besoins céréalier (TCBC) (ECONO)	[Rendement des cultures céréalières Revenu perçu de la vente des produits d'élevage (REV_ÉL), Production par habitant (PROD_CPT) Revenu sur les cultures de rente REV_RENTE), Taux de couverture des besoins céréalier (TCBC) Revenu sur les cultures vivrières (REV_AG)] (ECONO)
Disponibilité de l'eau	Nombre de forage (NBRE_FRG), Taux de couverture des besoins en eau (TCB_EAU), Débit des forges (DÉBIT_FG), Recharge des forages (RECHARGE), Quantité d'eau par habitant (QTÉ_HB), Déficit d'écoulement DEFICIT_ÉCOUL).	Nombre de forage (NBRE_FRG) Taux de couverture des besoins en eau (TCB_EAU), Débit des forges (DÉBIT_FG) Recharge des forages (RECHARGE), Quantité d'eau par habitant (QTÉ_HB),Déficit d'écoulement (DEFICIT_ÉCOUL).	Nombre de forage (NBRE_FRG) Taux de couverture des besoins en eau (TCB_EAU), Débit des forges (DÉBIT_FG), Recharge des forages (RECHARGE) Quantité d'eau par habitant (QTÉ_HB), Déficit d'écoulement (DEFICIT_ÉCOUL).
Bien-être social	Pauvreté (PAUVTÉ), Taux de scolarité (SCOLA), Taux d'alphabétisation (ALPHA), [Couverture en santé et accroissement de population et personne en charge] (SOCIO).	Pauvreté (PAUVTÉ), Taux de scolarité (SCOLA), Taux d'alphabétisation (ALPHA) [Couverture en santé, accroissement de population et personne en charge] (SOCIO)	Pauvreté (PAUVTÉ), Taux de scolarité (T_SCOLA) Taux d'alphabétisation (ALPHA),[Couverture en santé et accroissement de population et personne en charge] (SOCIO)

Tableau 5.2 Indices calculés et retenus après application de la corrélation non paramétrique de Spearman par province en 1984.

Provinces	CLIM	EAU_ HBT	NDVI	PRES_ ANTH	ECONO	NBRE_ FG	DÉFICIT_ ECOULT	TCB_ EAU	DBIT_ FG	RECHGE	PAUVTÉ	SCOLA	ALPH	SOCIO
Ganzourgou	0,2	-0,3	-0,3	0,3	0,3	-0,9	-0,1	-0,8	-0,7	-0,9	0,3	0,6	0,4	-0,2
Gangna	0,1	-0,3	-0,3	0,3	0,3	-0,8	0,3	-1,4	-0,2	1,2	-0,1	1,5	-0,4	-0,5
Gourma	-0,2	-0,3	-0,5	-0,2	0,4	-0,3	-0,2	0,5	-1,6	-1,1	-0,2	-1,7	-0,4	-0,1
Kouritenga	-0,1	-0,4	-0,5	-0,3	-0,3	-1,0	-0,9	-1,2	0,7	-0,9	-0,2	-0,1	-2,0	0,4
Namentenga	0,1	3,3	-0,1	0,2	0,0	0,1	-0,5	1,2	0,5	0,1	-0,3	-1,2	0,9	-0,2
Sanmatenga	-0,2	-0,2	0,1	-0,1	0,1	0,0	1,7	0,3	-0,5	-0,9	-0,8	-0,6	0,7	-0,1
Seno	-0,3	-0,4	-0,2	-0,4	-0,2	-0,8	-0,5	-0,5	0,0	0,1	1,8	-0,7	-1,2	0,9
Soum	0,3	-0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	-0,3	0,6	1,1	0,1	1,2	-0,6	0,7	-0,4
Kollo	0,5	-0,4	-0,1	0,3	0,0	0,6	-0,3	0,1	1,2	0,1	-0,9	0,4	0,6	-0,4
Say	0,0	-0,3	-0,4	-0,1	0,3	1,5	1,9	-0,1	0,0	1,2	-1,8	1,0	0,9	-0,4
Téra	-0,3	-0,4	4,3	-0,4	-0,2	-0,9	-1,0	0,2	-0,7	-0,9	-1,3	1,3	-0,7	0,8

Tableau 5.3.Idem au tableau 5.2 mais en 1994

Provinces	Prepl	Prop	CDD	Max3d	ENVI	PRES_	PRES_	ECON	REV_	PAUVRE	SCOLA	NBRE_	ALPHA	DÉFICIT_	TCB_	EAU_	RECH
	TOT					ANTH	CH		AG	TÉ		FRG		ECOULT	EAU	HBT	GE
Ganzourgou	0,9	0,7	-1,1		1,5	1,5	2,3	1,3	-0,3	0,2	0,6	-0,6	0,3	0,0	-1,0	-0,3	0,7
Gangna	0,2	-0,2	1,1	1,2	-0,2	-0,2	0,2	1,0	-0,8	-0,5	-1,2	0,0	0,5	-0,5	1,2	1,7	-0,3
Gourma	2,2	1,3	-1,3	-1,1	0,0	0,0	-1,0	1,3	0,2	-0,5	0,4	0,3	0,3	-0,4	1,1	0,6	0,7
Kouritenga	0,5	0,1	-0,9	-1,8	0,3	0,3	1,1	0,5	-0,8	0,2	1,9	1,0	0,3	-0,1	1,2	1,7	1,6
Namentenga	0,5	-0,2	0,1	0,9	1,3	1,3	-0,1	0,3	1,3	1,2	-0,6	0,1	0,3	-0,4	0,8	0,5	-0,3
Sanmatenga	-0,7	-0,3	-0,1	0,9	-0,7	-0,7	0,5	-0,3	1,3	-1,0	-1,4	0,2	0,2	-0,1	-1,4	-0,3	-1,2
Seno	-0,1	-0,2	-0,1	0,2	-0,5	-0,5	-0,9	-0,9	0,2	-1,0	-0,7	0,7	0,3	1,6	-1,0	-0,3	-1,2
Soum	-1,0	-0,5	-0,1	0,2	0,7	0,7	-0,1	-0,3	-0,8	1,2	0,7	1,7	0,2	2,2	-0,7	0,2	1,6
Kollo	-0,8	0,6	2,2	0,2	-1,1	-1,1	-0,4	-1,3	-1,8	-0,7	0,9	-1,3	-0,8	-1,0	0,6	-0,5	-1,2
Say	-0,6	-0,5	-0,2	-1,3	-0,9	-0,9	-0,6	-0,4	1,3	-1,0	0,1	-1,2	-0,8	-0,9	0,1	-0,4	-0,3
Téra	-1,2	-0,8	0,2	0,8	-0,5	-0,5	-0,9	-1,2	0,2	1,8	-0,8	-0,9	-0,7	-0,5	-0,8	-0,6	-0,3

Tableau 5.4 Idem au tableau 5.2 mais en 2004.

	CLIM	NDVI	EAU_HBT	EAU_HBT	PRES_ANTH	ECONO	NBRE_FG	DÉFICIT_ECOULT	TCB_EAU	DBIT_FG	RECHGE	PAUVTÉ	SCOLA	ALPH	SOCIO
Ganzourgou	0,4	-0,4	-0,3	0,2	0,1	-0,9	1,2	-1,3	-0,3	-0,9	-0,1	0,0	-0,4	-0,4	-0,4
Gangna	0,0	-0,3	-0,4	-0,3	-0,1	-0,7	2,4	-0,5	0,0	0,1	0,5	0,4	-0,4	-0,4	-0,4
Gourma	-0,4	-0,4	-0,5	-0,6	-0,3	-1,0	-1,0	-1,0	-1,4	-0,9	-0,3	0,7	-2,0	0,9	0,9
Kouritenga	0,5	-0,3	0,1	0,4	0,4	-0,6	0,0	-0,1	1,1	1,2	0,3	0,7	0,6	-0,3	-0,3
Namentenga	0,1	-0,3	-0,1	0,6	0,3	1,0	0,0	-0,1	1,7	2,2	0,3	1,9	0,7	-0,4	-0,4
Sanmatenga	0,0	-0,4	0,0	-0,3	-0,1	-0,9	-0,9	-0,2	1,9	0,1	-0,8	0,2	-1,4	0,4	0,4
Seno	0,1	3,1	-0,3	0,3	0,1	1,6	0,4	1,0	0,7	0,9	-0,9	-0,7	1,8	0,0	0,0
Soum	-0,1	-0,3	-0,1	-0,3	-0,7	0,7	2,5	0,2	-0,7	2,2	1,2	0,7	0,4	-0,3	-0,3
Kollo	-0,1	-0,2	-0,2	0,4	-0,3	1,3	-0,8	1,1	0,0	0,1	-1,8	-0,5	0,9	-0,4	-0,4
Say	-0,3	-0,3	-0,4	-0,2	0,1	1,6	1,2	0,6	-1,4	-0,9	-0,9	-0,5	0,9	-0,1	-0,1
Téra	-0,3	-0,4	-0,4	-0,5	-0,4	-0,5	-0,6	-0,5	-0,7	1,2	1,6	-0,5	-0,5	-0,7	0,7

Tableau 5.5 Matrice des valeurs de corrélation pour l'année 1984, utilisant une rotation Oblimin de l'échantillon, les valeurs en gras sont significativement différentes de 0, au seuil de 95 % (alpha=0,05).

Variables	CLIM	PRES	ANTH	NDVI	ÉCONO	ALPH	SOCIO	NBRE_FG	EAU_FG	HBT	DÉFICIT	TCB	EAU	RECHARGE
CLIM	1,00	0,70		0,74	0,67	0,71	-0,78	0,14	0,31		0,07	0,49		-0,22
PRES_ANTH	0,70	1,00		0,69	0,78	0,78	-0,61	0,36	0,09		-0,09	0,47		0,02
NDVI	0,74	0,69		1,00	0,74	0,74	-0,61	0,51	0,14		-0,06	0,23		-0,41
ÉCONO	0,67	0,78		0,74	1,00	0,90	-0,81	0,52	0,34		0,25	0,51		-0,06
ALPH	0,71	0,78		0,74	0,90	1,00	-0,85	0,61	0,45		0,33	0,27		-0,12
SOCIO	-0,78	-0,61		-0,61	-0,81	-0,85	1,00	-0,45	-0,71		-0,59	-0,37		-0,13
NBRE_FG	0,14	0,36		0,51	0,52	0,61	-0,45	1,00	0,24		0,17	-0,37		-0,15
EAU_HBT	0,31	0,09		0,14	0,34	0,45	-0,71	0,24	1,00		0,94	0,05		0,32
DÉFICIT_ECOULT	0,07	-0,09		-0,06	0,25	0,33	-0,59	0,17	0,94		1,00	0,06		0,44
TCB_EAU	0,49	0,47		0,23	0,51	0,27	-0,37	-0,37	0,05		0,06	1,00		0,21
RECHARGE	-0,22	0,02		-0,41	-0,06	-0,12	-0,13	-0,15	0,32		0,44	0,21		1,00
PAUVRETÉ	-0,17	0,06		-0,09	-0,14	0,06	-0,01	-0,12	0,34		0,38	-0,09		0,53

Tableau 5.6 Idem au tableau 5.5 mais en 1994

Variables	Prepl	ENV	PRES ANTH	REV	ÉCONO	PAUVRE TÉ	ALPH	SOCIO	NBRE FG	DÉFICIT ÉCOULT	TCB_EAU	EAU_HBT
Prepl	1,00	0,67	0,47	0,83	-0,12	-0,16	0,61	-0,64	0,18	-0,15	0,47	0,48
ENV	0,67	1,00	0,58	0,76	-0,51	-0,13	0,63	-0,76	0,34	-0,08	0,55	0,72
PRES_ANTH	0,47	0,58	1,00	0,61	-0,66	0,53	0,60	-0,68	0,38	0,28	0,03	0,26
REV	0,83	0,76	0,61	1,00	-0,26	-0,05	0,70	-0,75	0,25	-0,11	0,39	0,62
ÉCONO	-0,12	-0,51	-0,66	-0,26	1,00	-0,46	-0,24	0,28	-0,18	-0,19	-0,22	-0,36
PAUVRETÉ	-0,16	-0,13	0,53	-0,05	-0,46	1,00	-0,01	-0,01	0,17	0,17	-0,04	0,02
ALPH	0,61	0,63	0,60	0,70	-0,24	-0,01	1,00	-0,93	0,73	0,44	0,10	0,62
SOCIO	-0,64	-0,76	-0,68	-0,75	0,28	-0,01	-0,93	1,00	0,04	-0,43	-0,19	-0,63
NBRE_FG	0,18	0,34	0,38	0,25	-0,18	0,17	0,73	-0,77	1,00	0,79	-0,02	0,48
DÉFICIT ÉCOULT	-0,15	-0,08	0,28	-0,11	-0,19	0,17	0,44	-0,43	0,79	1,00	-0,47	-0,05
TCB_EAU	0,47	0,55	0,03	0,39	-0,22	-0,04	0,10	-0,19	-0,02	-0,47	1,00	0,74
RECHARGE	0,33	0,46	0,59	0,52	-0,53	0,47	0,34	-0,54	0,54	0,31	0,25	0,48
EAU_HBT	0,48	0,72	0,26	0,62	-0,36	0,02	0,62	-0,63	0,48	-0,05	0,74	1,00

Tableau 5.7 Idem au tableau 5.5 mais en 2004.

Variables	CLIM	PRES_ANTH	ÉCONO	ALPH	SOCIO	NBRE_FG	EAU_HBT	DÉFICIT_ECOULT	TCB_EAU	RECHARGE
CLIM	1,00	0,64	0,40	0,55	-0,61	0,13	0,05	-0,02	0,17	0,12
PRES_ANTH	0,64	1,00	0,63	0,69	-0,73	0,44	0,23	-0,03	0,26	0,33
ÉCONO	0,40	0,63	1,00	0,46	-0,57	0,17	0,30	0,27	0,09	0,07
ALPH	0,55	0,69	0,46	1,00	-0,76	0,74	0,63	0,29	0,67	0,31
SOCIO	-0,61	-0,73	-0,57	-0,76	1,00	-0,52	-0,63	-0,45	-0,29	-0,31
NBRE_FG	0,13	0,44	0,17	0,74	-0,52	1,00	0,69	0,17	0,64	0,41
EAU_HBT	0,05	0,23	0,30	0,63	-0,63	0,69	1,00	0,83	0,30	0,40
DÉFICIT_ECOULT	-0,02	-0,03	0,27	0,29	-0,45	0,17	0,83	1,00	-0,07	0,23
TCB_EAU	0,17	0,26	0,09	0,67	-0,29	0,64	0,30	-0,07	1,00	-0,02
RECHARGE	0,12	0,33	0,07	0,31	-0,31	0,41	0,40	0,23	-0,02	1,00

Tableau 5.8 Qualité de représentation des indices

1984			1994			2004		
Variables	Initial	Extraction	Variables	Initial	Extraction	Variables	Initial	Extraction
CLIM	1,000	,604	PrcpI	1,000	,864	CLIM	1,000	,616
NDVI	1,000	,714	PrcpTOT	1,000	,478	PRES_ANTH	1,000	,697
EAU_HECT	1,000	,860	CDD	1,000	,319	ECON	1,000	,640
PRES_ANTH	1,000	,607	Max3d	1,000	,365	TCBC	1,000	,890
DEFICIT_ÉCOU	1,000	,763	ENVI	1,000	,842	REV_AG	1,000	,857
ECONO	1,000	,855	PRES_ANTH	1,000	,726	EAU_HBT	1,000	,679
EAU_HBT	1,000	,707	ECON	1,000	,873	RECHARGE	1,000	,619
TCB_EAU	1,000	,687	REV	1,000	,794	DÉFICIT	1,000	,827
RECHARGE	1,000	,808	PAUVRETÉ	1,000	,670	DÉBIT_FG	1,000	,866
PAUVRETÉ	1,000	,186	SCOLA	1,000	,346	SOCIO	1,000	,717
SCOLA	1,000	,284	SOCIO	1,000	,948	SCOLA	1,000	,298
ALPH	1,000	,906	NBRE_FRG	1,000	,631	ALPH	1,000	,975
SOCIO	1,000	,871	DÉFICIT_ECOULT	1,000	,728			
			TCB_EAU	1,000	,724			
			EAU_HBT	1,000	,552			

Les tableaux 5.5, 5.6 et 5.7 représentent les matrices de corrélation pour les années 1984, 1994 et 2004. Elles montrent l'existence de corrélations entre les indices d'origines diverses. Les fortes valeurs en gras confirment l'existence de plusieurs corrélations significatives entre variables. Cette identification des variables explicatives permet de réduire le nombre des variables pour les ACP, réalisées ultérieurement. D'après les tableaux 5.8, les indices comme scolarité (SCOLA) et pauvreté (PAUVRETÉ) ont été éliminés de la matrice de 1984, tandis que la précipitation totale (PrcpTOT), le maximum de précipitation en trois jours consécutifs (Max3d), le maximum de jours consécutifs secs et le taux de scolarité sont éliminés dans celle de 1994, alors que seul le taux de scolarité présente une valeur de communalité inférieure à 0,50. Les indices qui présentent de fortes contributions ont été utilisés pour la suite de l'analyse.

5.2 Résultats et interprétation de l'Analyse en Composantes Principales

Le nombre de composantes à retenir a été obtenu en utilisant la règle de Kaiser (1968), selon lequel les composantes principales, pour lesquelles la valeur propre est supérieure à l'unité, sont retenues, celles-ci devant expliquer plus de variation qu'une variable originale. Le tableau 5.9 et la figure 5.4 illustrent les variances expliquées par composante et/ou cumulative pour les années 1984, 1994 et 2004. Seule les trois premières

composantes ont été sélectionnées afin de définir les critères de vulnérabilité. D'après le tableau 5.9, les contributions factorielles (coefficients) des indices sont significatives. Les trois composantes contribuent ensemble à 82-85% de la variance expliquée selon les années. Les premières composantes regroupent les indices les plus importants, pour ce qui a trait à la vulnérabilité des populations du bassin de la Sirba.

Les composantes restituées par les structures sont traduites en critères, qui sont définis selon la nature des indices. Les tableaux 5.10, 5.511 et 5.12 dressent le bilan de l'analyse en composantes principale selon les années 1984, 1994 et 2004. La première colonne des tableaux contient les composantes ou critères et les indices contenus dans chaque critère. La seconde colonne renferme les coefficients des indices (leur contribution factorielle); la troisième colonne contient la variance expliquée par chacune des composantes et la variance totale expliquée par le modèle.

Tableau 5.9 Variance expliquée par le modèle pour les échantillons de 1984, 1994 et 2004.

Composantes	1984			1994			2004		
	Valeur propre Initiale			Extraction des sommes des carrés des facteurs retenus			Somme des carrés des facteurs retenus pour la rotation		
	Valeur propre	Variabilité (%)	% cumulé	Valeur propre	Variabilité (%)	% cumulé	Valeur propre	Variabilité (%)	% cumulé
F1	5,4	49,5	49,5	4,800	48,000	48,000	4,5	50,0	50,0
F2	2,3	21,1	70,6	1,921	19,205	67,205	2,0	21,9	71,9
F3	1,6	14,6	85,2	1,530	15,300	82,505	1,1	12,5	84,4
F4	0,8	7,3	92,5	0,697	6,966	89,471	0,9	10,0	94,5
F5	0,4	3,3	95,8	0,603	6,034	95,506	0,3	3,0	97,5
F6	0,2	1,8	97,6	0,293	2,935	98,440	0,1	1,4	98,9
F7	0,1	1,3	98,9	0,121	1,211	99,651	0,1	1,0	99,9
F8	0,1	0,6	99,5	0,022	0,224	99,875	0,0	0,1	100,0
F9	0,0	0,3	99,9	0,012	0,125	100,000	0,0	0,0	100,0
F10	0,0	0,1	100,0	0,000	0,000	100,000	0,0	0,0	100,0

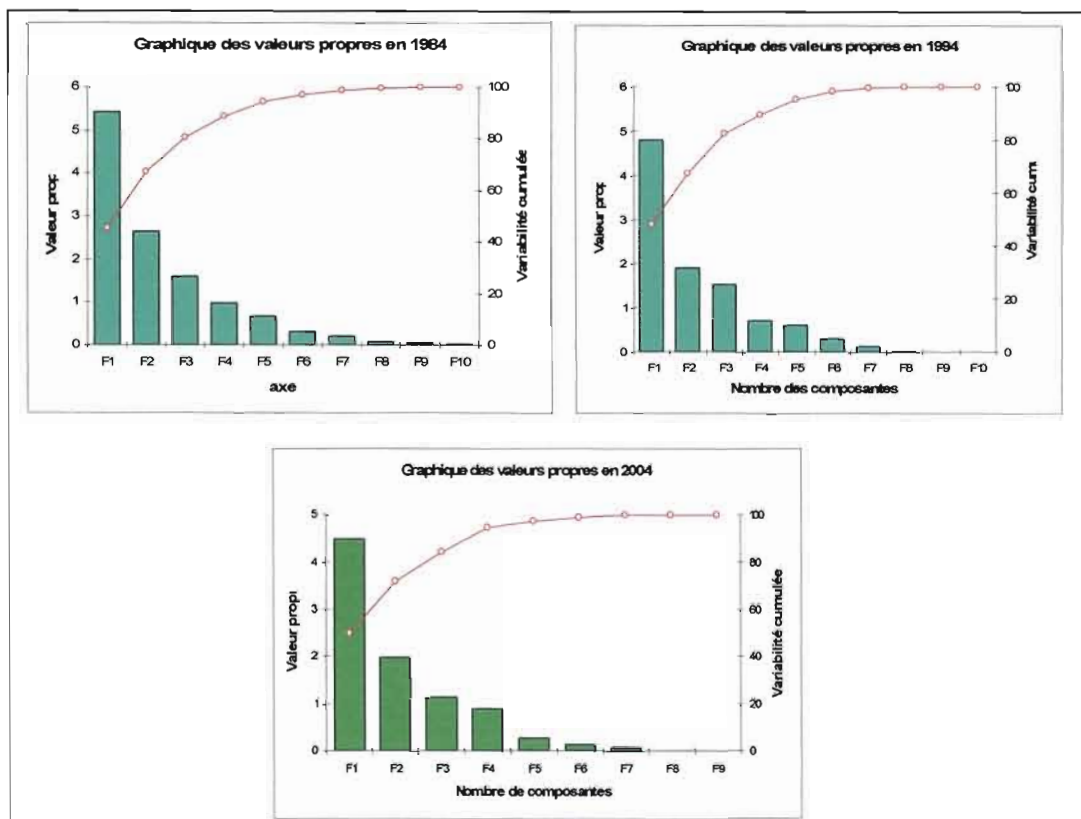


Figure 5.4 Graphique des valeurs propres et du pourcentage de variance expliquée par composantes principales, et selon les trois structures factorielles de 1984, 1994 et 2004.

5.2.1 Résultats pour l'année 1984

Le tableau 5.10 récapitule le bilan de l'analyse en composantes principales sur les indices en 1984, tandis que la figure 5.5 présente le regroupement des indices sur les axes factoriels. La dénomination de ces axes factoriels en critères est fonction de la nature des indices qui les composent. Les trois critères représentent les trois composantes par ordre d'importance en combinant les indices environnementaux et socio-économiques présentés au tableau 5.1 et défini au tableau 5.2.

Tableau 5.10 Répartition des indices des trois premières composantes de l'ACP en 1984.

Composantes et variables	Coefficients	Variance expliquée (%)
Composante I : Critère «Condition environnementale et capacité de réponse»		49,5
1. Économie (ÉCONO)	0,851	
2. Niveau d'instruction (ALPH)	0,850	
3. Indice de végétation (NDVI)	0,779	
4. Pression anthropique (PRES_ANTH)	0,751	
5. climat (CLIM)	0,737	
6. Accès aux soins de santé, accroissement démographique et personnes en charge (SOCIO)	0,641	
Composante II : Critère «Disponibilité des ressources en eau»		21,1
1. Déficit d'écoulement (DÉFICIT_ÉCOULT)		
2. Quantité d'eau par habitant (EAU_HBT)	0,946	
3. Recharge des forages (RECHARGE)	0,867	
	0,382	
Composante III : Critère «Disponibilité en eau potable»		14,6
1. Population ayant accès à l'eau potable (TCB_EAU)	0,700	
2. Nombre d'infrastructures hydrauliques (NBRE_FG)	0,583	
Variance totale expliquée par la structure (%)		85,209

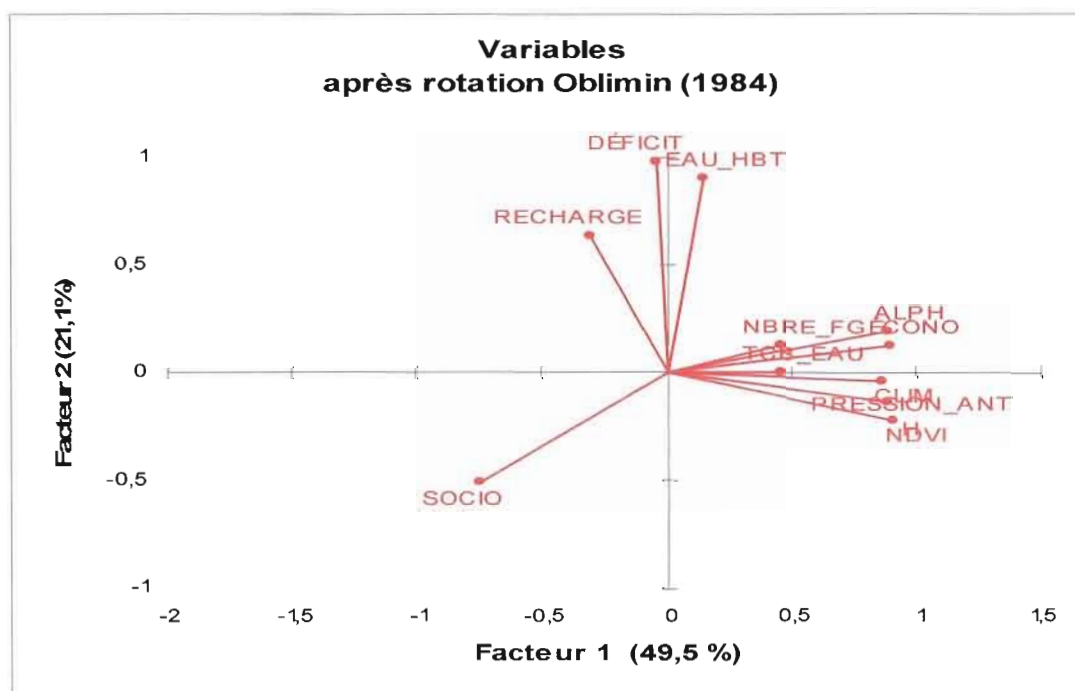


Figure 5.5 Projection des indices sur les deux premiers axes factoriels en 1984.

D'après les résultats d'analyse en composantes principales de 1984 (cf. tableau 5.10), le modèle dégage trois critères correspondant aux trois axes factoriels : «Condition environnementale et capacité de réponse des populations», «Disponibilité des ressources en eau» et «Disponibilité en eau potable». Ces critères expliquent 85,2 % de la variance de la vulnérabilité des populations face à la variabilité du climat. Le premier critère représente 49,5% de la variance expliquée, et regroupe six (6) des onze (11) indices impliqués dans l'analyse dont : l'économie (ÉCONO), l'indice de végétation (NDVI), la pression anthropique (PRES_ANTH), le climat (CLIM), l'accès aux soins de santé, accroissement démographique et personnes en charge (SOCIO) et le niveau d'instruction des adultes (ALPH), tel qu'illustrés à la figure 5.5. Le second critère «Disponibilité des ressources en eau» combinent les indices déficit d'écoulement, quantité d'eau par habitant et recharge des puits et forages. Il exprime 21,1 % de la variance expliquée totale.

Le troisième critère : «Disponibilité en eau potable» est déterminé par deux indices : le nombre d'infrastructures hydrauliques (NBRE_FG) par province et le pourcentage de population ayant accès à l'eau potable (TCB_EAU). Ce critère exprime 14,6 % de la variance de la vulnérabilité des populations.

D'après la figure 5.5, les indices sont regroupés et projetés dans le même sens, selon les trois axes factoriels dans l'espace de rotation, excepté l'indice SOCIO qui est projeté dans le sens opposé des autres indices qui forment le premier axe factoriel. Ceci s'explique par le fait que cet indice est négativement corrélé aux autres indices (cf. figure.5.1) et indique que la détérioration du bien être social telles que l'augmentation du nombre de personnes en charge et la croissance démographique entraîne une exacerbation des problèmes environnementaux tel que montré à la section 3.2.3 du chapitre 3. Tous les indices regroupés dans ce critère contribuent de façon significative (i.e. plus de 60% de sa variance) à la variance de ce critère sur le territoire de la Sirba, en particulier l'économie (0,851) et l'indice de végétation (0,779) suivi de la pression anthropique (0,751) et du climat (0,737).

Ce regroupement d'indices variés suggère une forte interrelation ou interdépendance entre le régime des pluies, et les conditions environnementales, socio-économiques et humaines qui caractérisent le bassin de la Sirba en 1984, en raison de la prépondérance de

l'agriculture non irriguée et la forte saisonnalité des pluies qui rythment les activités anthropiques et l'évolution annuelle de l'environnement. Comme démontré plus haut au à la section 3.1.2 du chapitre 3, les trois zones écologiques du bassin ont connu ces dernières décennies des sécheresses récurrentes. L'analyse des moyennes pluviométriques pour la période 1961-2004 révèle que la décennie 1980 reste la plus déficitaire et l'année 1984 est la plus sèche sur les 44 ans couverts par nos données. En plus, cette irrégularité des pluies combinée à la démographie galopante (avec un taux d'accroissement qui varie de 2 à 3 %), a eu de multiples conséquences sur l'environnement (section 4.2.3 du chapitre 4), ainsi que sur différents secteurs du développement économique et social de la région.

5.2.2 Résultats pour l'année 1994

D'après les résultats de l'analyse en composantes principales de 1994 (cf. tableau 5.11 et figure 5.6). La structure factorielle a restitué trois critères : «Condition structurelle et qualité de l'environnement», «Condition environnementale et capacité de réponse» et «Couverture des besoins en eau potable» ces critères expliquent 82,5 % de la variance de la vulnérabilité des populations.

Tableau 5.11 Idem au tableau 5.10 mais pour l'année 1994.

Composantes et variables	Coefficients	Variance expliquée (%)
Composante I : Critère «Condition structurelle et qualité de l'environnement»,		48 %
1. Accès aux soins de santé, personnes en charge accroissement démographique (SOCIO)	0,970	
2. Taux d'instruction (ALPHA)	0,923	
3. Indice normalisé de végétation et qualité de l'eau (ENV)	0,479	
4. Pourcentage de jours humides (Prcl)	0,396	
5. Quantité d'eau par habitant (EAU_HBT)	0,390	
Composante II : Critère «Condition environnementale et capacité de réponse»		19,2 %
1. Économie (REV)	0,724	
2. Population vivant en dessous du seuil de pauvreté (PAUVRETÉ)	0,719	
3. Pression anthropique (PRES_ANTH)	0,583	
Critère III : Critère «Couverture des besoins en eau potable »		
1. Population ayant accès à l'eau potable (TCB_EAU)	0,546	15,3 %
2. Déficit d'écoulement (DÉFICIT_ÉCOULT)	0,768	
Variance totale expliquée par la structure		82,5%

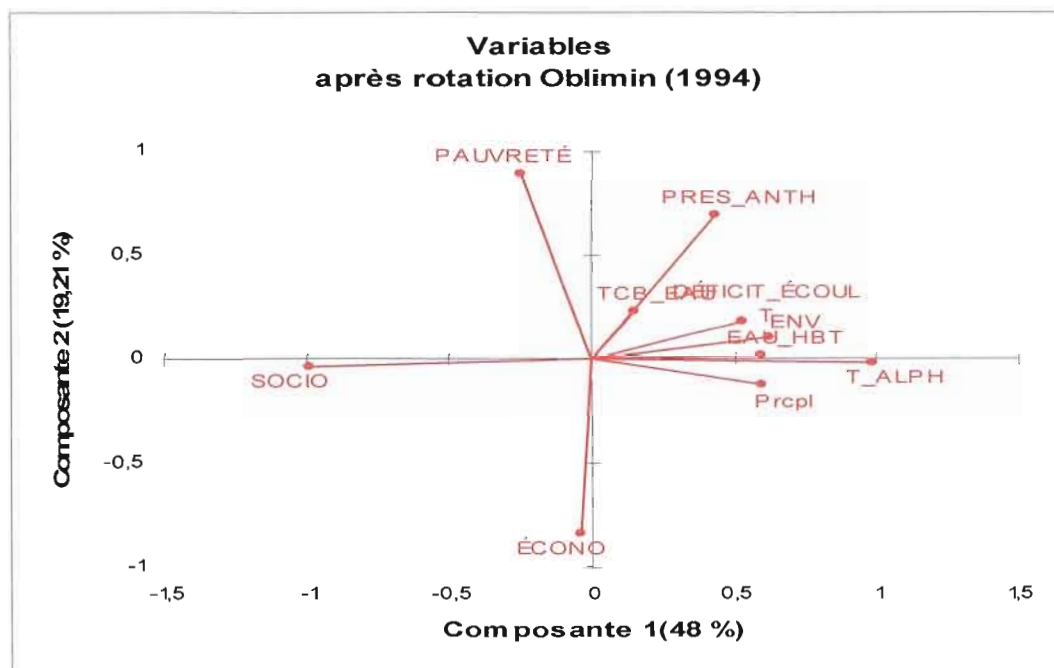


Figure 5.6 Idem à la figure 5.5 mais pour l'année 1994

D'après la figure 5.6, les indices sociaux et économiques sont disposés dans le sens opposé des autres indices (climat, environnement et ressources hydriques) dans l'espace de rotation. Ceci indique d'une part que les conditions économiques en 1994 n'étaient pas liées seulement au climat, mais aux conditions socio-structurelles. En effet, comme suggéré au chapitre 3, la décennie 1990 a connu une augmentation des moyennes pluviométriques par rapport à la décennie 1984 ou proche de la moyenne normale 1961-1990 et l'année 1994 est la plus humide des trois dernières décennies (1970-2000). Cependant, l'analyse de la situation socioéconomique du bassin de la Sirba (i.e. chapitre V) indique que le nombre de population vivant sous le seuil de la pauvreté a augmenté entre les 1994 à 2003. Par conséquent, le climat n'était pas un facteur prépondérant de la vulnérabilité des populations, mais plutôt la détérioration du bien-être social suite aux effets cumulatifs de la récurrence de la sécheresse des années 1980.

Le second critère «Condition environnementale et capacité de réponse» est différent du second critère identifié en 1984 (cf. tableau 5.4) et explique 19,2 % de la variance de la vulnérabilité. Il regroupe l'économie (0,724), le pourcentage de population vivant en dessous

vulnérabilité. Il regroupe l'économie (0,724), le pourcentage de population vivant en dessous du seuil de pauvreté (0,719) et la pression anthropique (0,583). Ces indices faisaient partie du premier critère en 1984, leur regroupement dans le second critère en 1994 indique qu'en absence de facteurs conjoncturels de vulnérabilité tel que le climat, d'autres facteurs structurels telles que la pauvreté, la dégradation des terres suite à leur gestion anarchique subsistent, malgré les stratégies d'adaptation développées pour contrer les effets néfastes de la grande sécheresse 1980-1989. Le taux d'occupation des terres par les activités agropastorales est en augmentation (section 3.3.3). Le troisième critère «Disponibilité en eau» contient les indices population ayant accès à l'eau potable et le déficit d'écoulement. Ce critère explique 15,3 % de la variance de la vulnérabilité des populations.

5.2.3 Résultats pour l'année 2004

La figure 5.7 et le tableau 5.12 Présentent les résultats d'analyse en composantes principales sur les indices de 2004.

Tableau 5.12 Idem au Tableau 5.10 mais pour l'année 2004.

Composantes et variables	Coefficients	Variance expliquée (%)	Alpha de Chronbach
Composante I : Critère «Condition environnementale et capacité de réponse»		50,0	0,703
1. Pression anthropique (PRES_ANTH)	0,905		
2. Accès aux soins de santé et accroissement démographique (SOCIO)	0,700		
3. Niveau d'instruction (ALPH)	0,646		
4. Climat (CLIM)	0,558		
Composante II : Critère «Disponibilité des ressources en eau»		21,9	0,737
1. Déficit d'écoulement	0,879		
2. Quantité d'eau par habitant	0,949		
3. Indices économiques	0,383		
Composante III : «Disponibilité en eau potable»		12,5	0,584
• Pourcentage de population ayant accès à l'eau potable	0,844		
• Recharge des forages puits	0,324		
Variance totale expliquée par la structure		84,4	

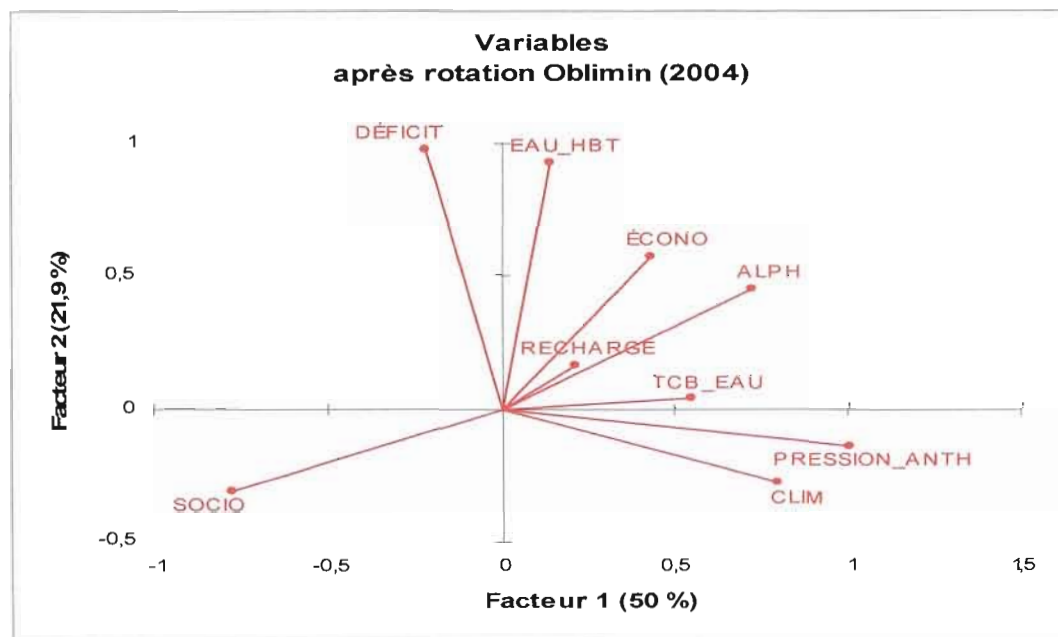


Figure 5.7 Idem à la figure 5.5 mais pour l'année 2004.

D'après le tableau 5.12, la structure factorielle de 2004 a restitué trois critères. Le critère «Condition environnementale et capacité de réponse» regroupe les indices pression anthropique, accès aux soins de santé et accroissement démographique, taux d'instruction et climat et exprime 50% de la variance de la vulnérabilité. Le second critère «Disponibilité des ressources en eau» est composé de trois indices dont le déficit d'écoulement, la quantité d'eau par habitant et l'économie et exprime 21,9 % de la variance interne et le dernier critère «Disponibilité en eau potable» réunit deux indices, le pourcentage de la population ayant accès à l'eau potable et la recharge de puits et forage et restitue 12, % de la variance interne.

D'après la figure 5.7, il existe une similitude entre la structure factorielle de 2004 et celle de 1984. La différence se remarque seulement dans la contribution des indices. En 2004, la contribution factorielle de la pression anthropique est de 0,905, alors qu'elle n'est que de 0,751 en 1984 (cf. tableau 5.10 et 5.12). En effet, les caractéristiques climatiques de ces deux années sont semblables, qui ont enregistré les plus faibles moyennes pluviométriques durant les décennies 1980-1989 et 1994-2004 pour la majorité des stations.

Il ressort de l'analyse des résultats trois principaux critères que les conditions environnementales et socio-économiques dominant, incluant les ressources en eau, pour la première et la dernière année (1984 et 2004), et les conditions environnementales et structurelles et la pression anthropique et capacité de réponse pour l'année 1994. La disponibilité en eau dans l'environnement pour les activités agropastorales et domestiques est un indice omniprésent quelle que soit l'année. Ainsi, le point commun entre les deux premiers critères des trois années est l'environnement, les besoins sanitaires de base des populations, et de l'agriculture et de l'élevage pouvant être variablement satisfaits, en particulier durant les années sèches. Quoi qu'il en soit, les conditions structurelles et le bien être humain en général se retrouvent parmi les premiers critères pour chaque année, même s'il est plus omniprésent et plus marqué en 1994

5.3 Analyse spatiale de la vulnérabilité pour les trois années : 1984, 1994 et 2004.

La seconde étape de notre travail consiste à analyser spatialement sur l'ensemble du territoire de la Sirba les variations des trois critères (composantes) au cours des trois années 1984, 1994 et 2004. Les contributions factorielles des provinces (observation) ont servi à la classification hiérarchique afin de regrouper les provinces en fonction de leur degré de vulnérabilité (cf. tableau 5.13). Les chiffres contenus dans le tableau 5.5 représentent le poids alloué à chaque critère par province et représente le coefficient de la combinaison des indices contenus dans chacun des critères. Pour chacune des années, ces coefficients ont été pondérés sur une échelle hiérarchique qui varie de 1 à 3 (cf. tableau 5.14).

Le chiffre 1 signifie une vulnérabilité faible tandis que le 3 indique une vulnérabilité élevée. Ces valeurs pondérées obtenues, ont ensuite servi à calculer le pourcentage de provinces vulnérables par rapport à chaque critère. Elles ont également été utilisées pour la cartographie et à l'analyse spatiale de la vulnérabilité sur le bassin à l'aide du système d'information géographique. Les résultats de cette analyse sont présentés sur les figures 5.8 à 5.19.

Tableau 5.13 Contribution factorielles ou poids respectifs des critères par province selon les années 1984, 1994, et 2004. Ces valeurs ont été calculées par la méthode Ward à l'aide du logiciel SPSS.

Provinces	1984			1994			2004		
	Critère1	Critère2	Critère3	Critère1	Critère2	Critère3	Critère1	Critère2	Critère3
Ganzougou	0,90	-0,36	-0,96	1,51	-0,05	-0,34	1,49	-0,38	0,25
Gnagna	1,13	-0,82	0,22	0,47	-0,55	1,05	0,51	0,70	1,76
Gourma	0,89	0,58	-1,55	0,83	-0,25	0,57	1,03	-0,17	0,42
Kouritenga	0,93	0,59	-1,46	1,20	0,71	0,48	0,58	0,32	1,92
Namentenga	1,22	-0,36	-0,61	1,02	-0,32	0,55	0,28	-0,35	1,71
Soum	-0,45	1,98	-0,95	-0,27	2,63	0,44	-0,21	2,57	0,75
Sanmatenga	-0,36	-0,49	0,03	-0,91	-0,35	1,06	0,18	-0,45	1,67
Seno	-0,08	0,72	-0,74	-0,21	1,08	0,26	0,10	1,21	1,03
Kollo	-1,66	-1,08	-1,40	-1,26	-1,25	-0,83	-1,27	-1,32	-0,28
Say	-1,07	-1,00	-1,50	-0,64	-0,95	-0,78	-0,99	-1,10	-0,40
Téra	-2,04	-0,56	-1,17	-1,33	-0,59	-0,78	-1,53	-0,35	-0,42

Tableau 5.14 Classification selon trois groupes de vulnérabilité : faible (1), moyen (2) et élevée (3) des provinces selon les trois années 1984, 1994 et 2004.

Provinces	1984			1994			2004		
	Critère1	Critère2	Critère3	Critère1	Critère2	Critère3	Critère1	Critère2	Critère3
Ganzourgou	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Gnagna	1	1	2	1	1	1	2	1	1
Gourma	1	1	1	1	1	1	1	1	2
Kouritenga	1	2	1	2	1	1	2	1	1
Namentenga	1	1	1	1	2	2	2	1	1
Sanmatenga	3	2	3	3	2	3	2	2	3
Séno	2	2	2	2	2	2	2	2	3
Soum	3	3	3	3	3	3	2	3	3
Kollo	3	1	3	3	2	3	3	2	2
Say	3	1	3	2	2	2	3	2	2
Téra	3	1	3	3	3	2	3	3	3

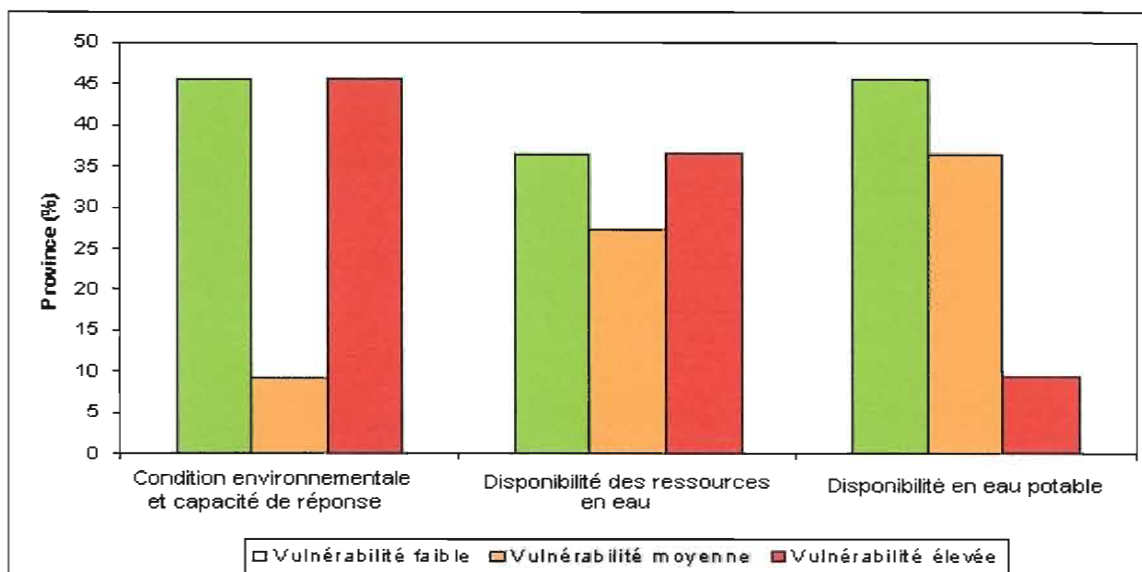


Figure 5.8 Pourcentage de provinces vulnérables aux critères : «Condition environnementale et capacité de réponse», «Disponibilité des ressources en eau» et «Disponibilité en eau potable» en 1984.

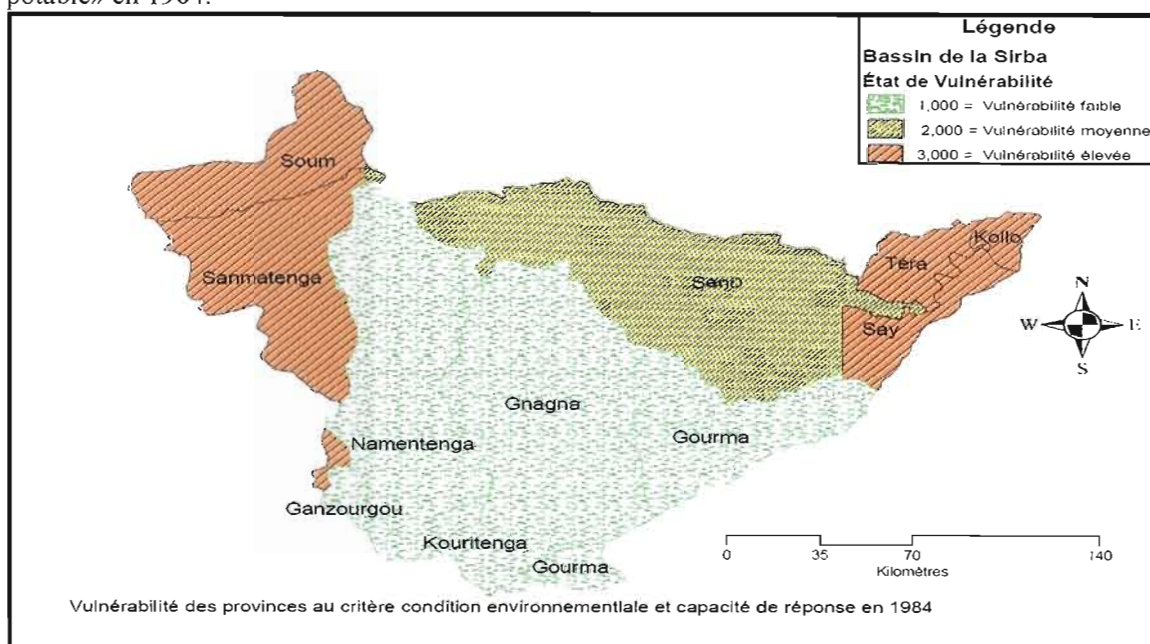


Figure 5.9 Carte de vulnérabilité des provinces au critère «Condition environnementale et capacité de réponse» en 1984.

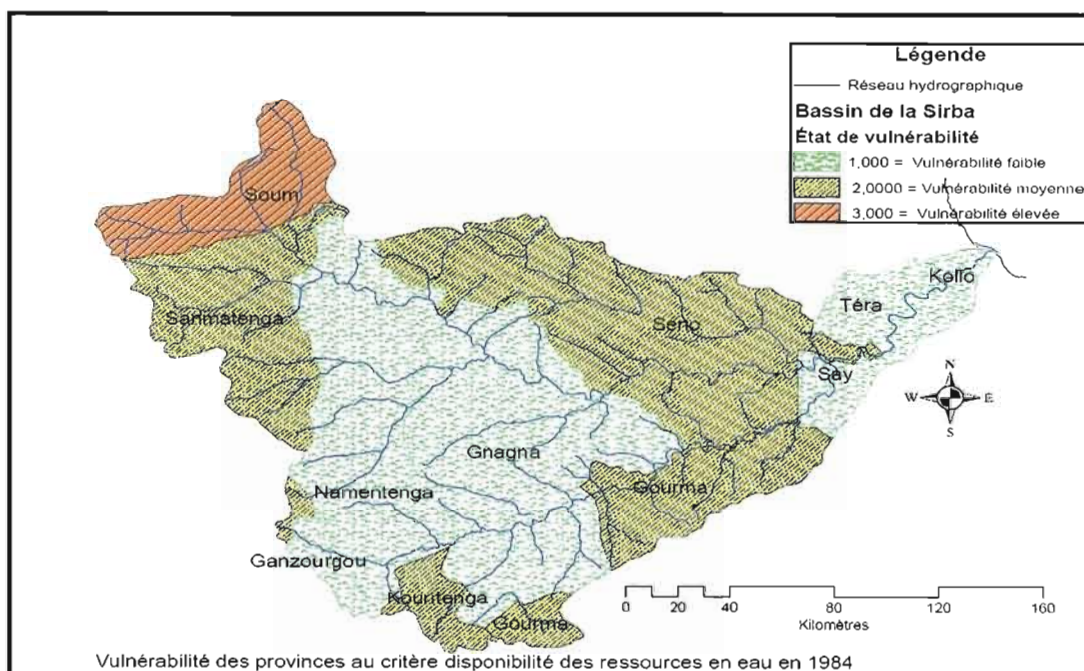


Figure 5.10 Carte de vulnérabilité des provinces au critère «Disponibilité des ressources en eau» en 1984.

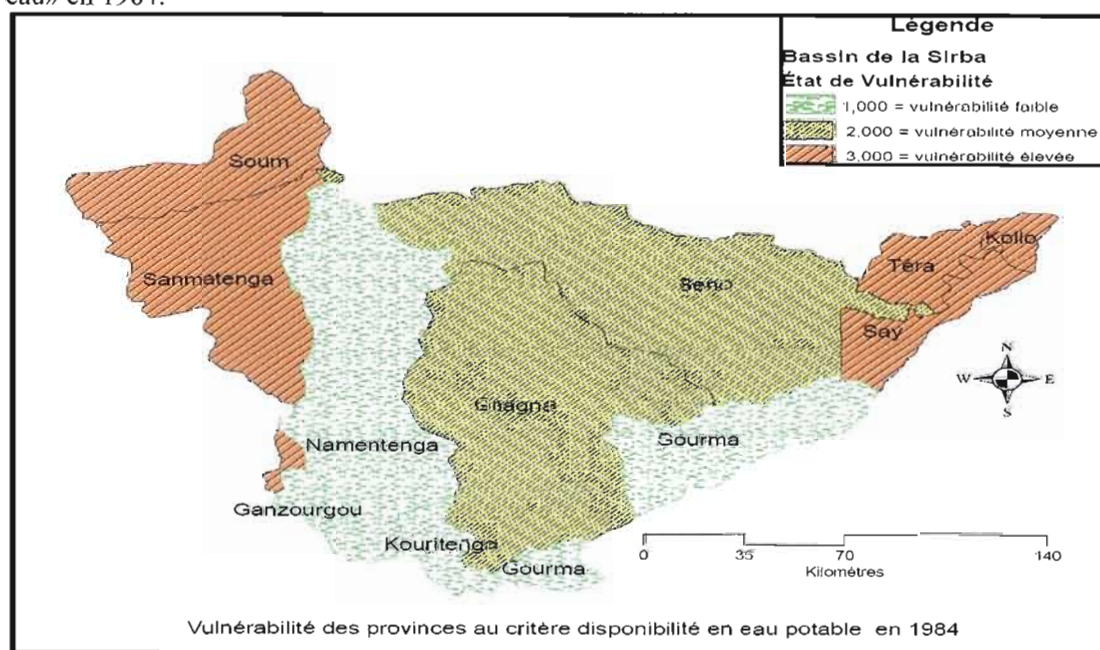


Figure 5.11 Carte de vulnérabilité des provinces au critère «Disponibilité en eau potable en 1984».

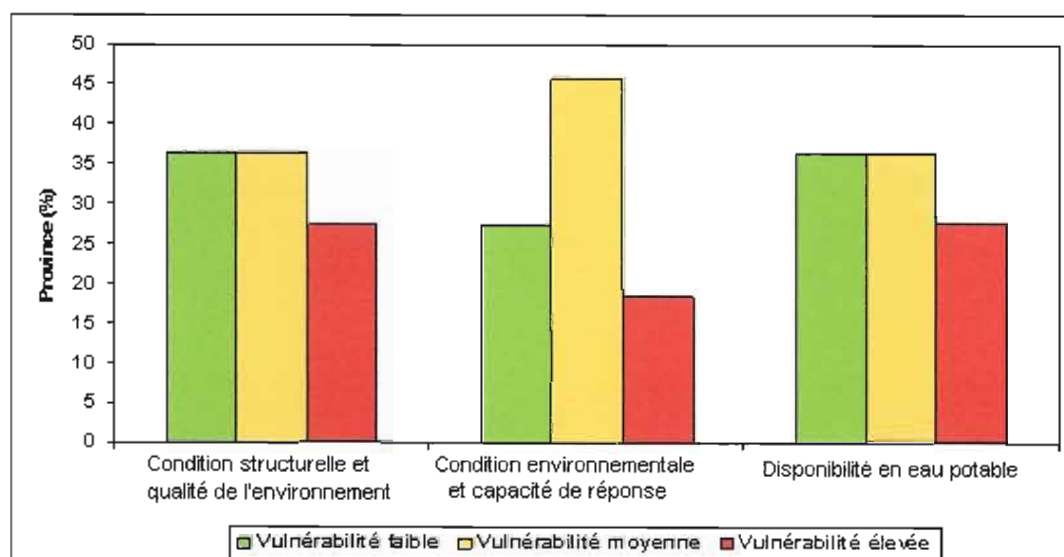


Figure 5.12 Pourcentage de provinces vulnérables aux critères : «Condition structurelle et qualité de l'environnement»; «Condition environnementale et capacité de réponse» et «Disponibilité en eau potable» en 1994.

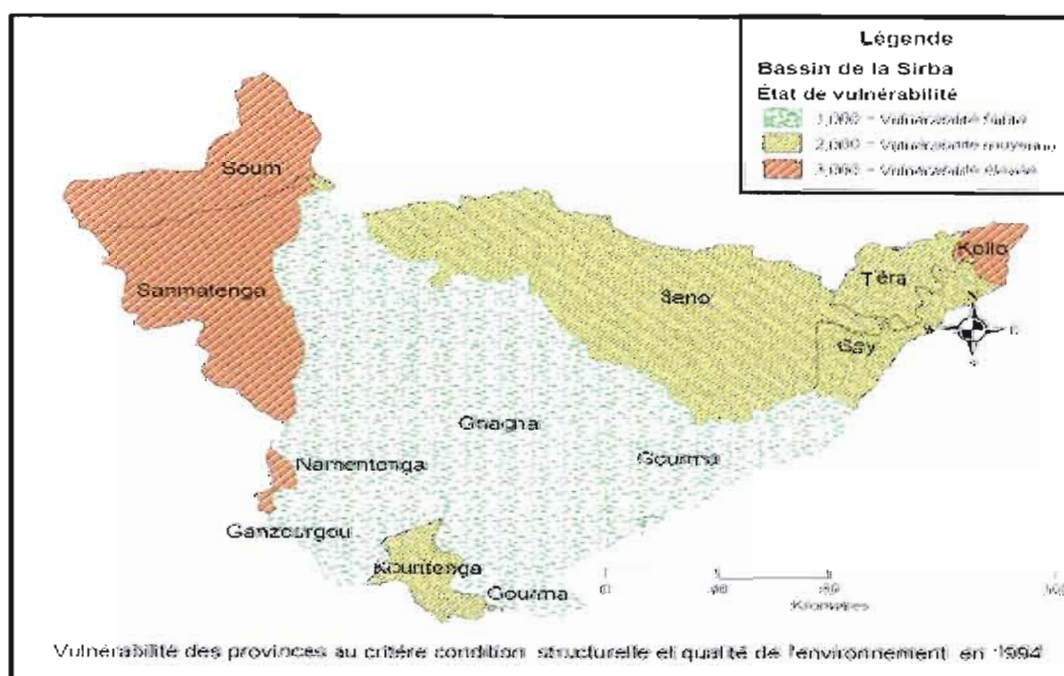


Figure 5.13 Carte de vulnérabilité des provinces au critère «Condition structurelle et qualité de l'environnement» en 1994.

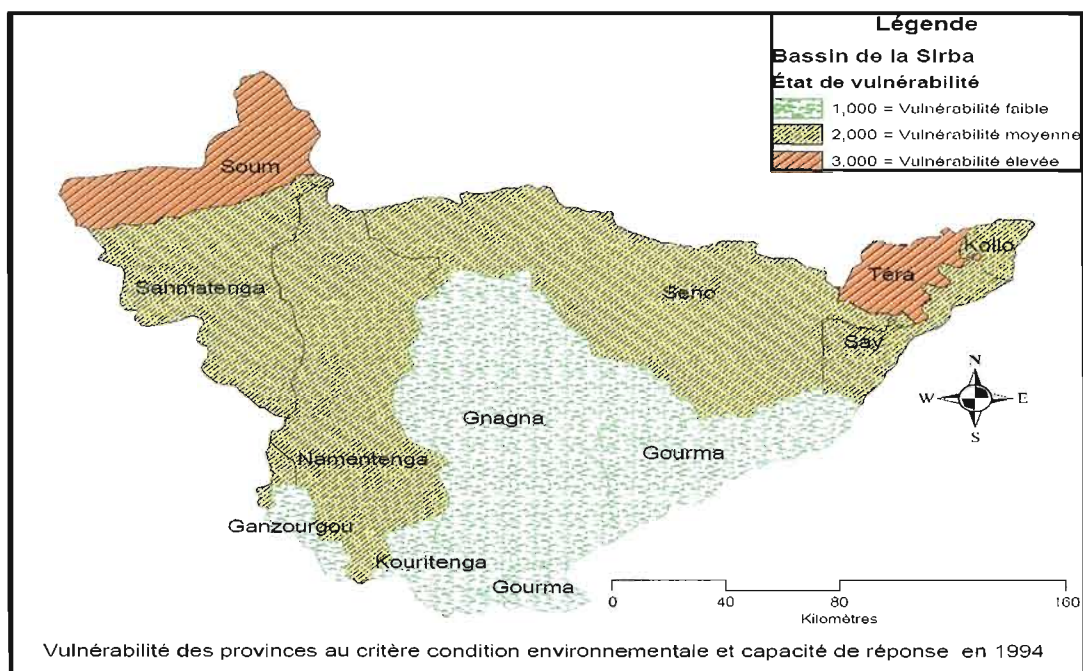


Figure 5.14 Carte de vulnérabilité des provinces au critère «Condition environnementale et capacité de réponse » en 1994

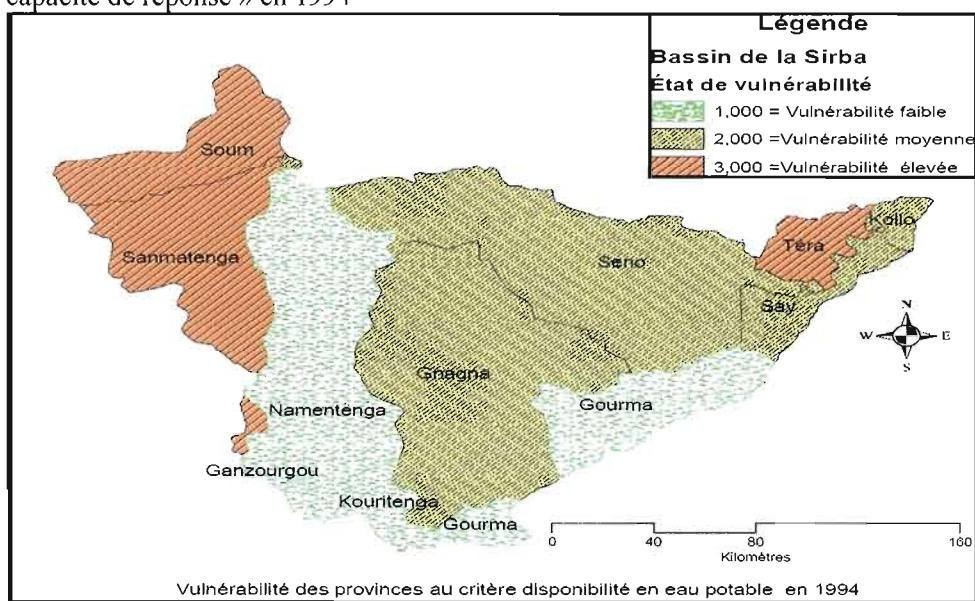


Figure 5.15 Carte de vulnérabilité des provinces au critère «Disponibilité en eau potable» en 1994.

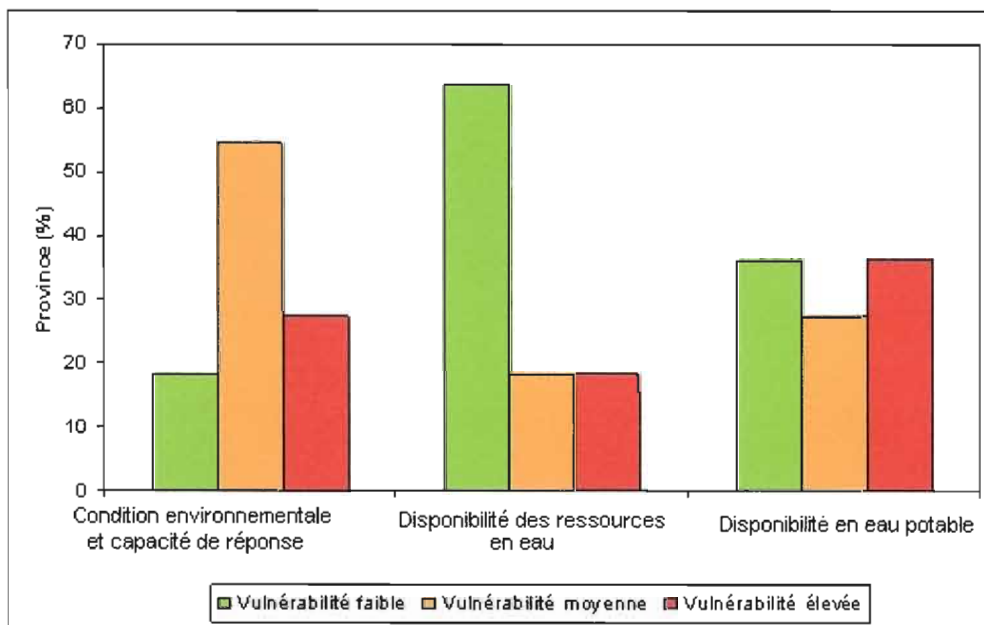


Figure 5.16 Pourcentage de provinces vulnérables aux critères : «Condition environnementale et capacité de réponse», «Disponibilité des ressources en eau » et «Couverture des besoins en eau potable» en 2004.

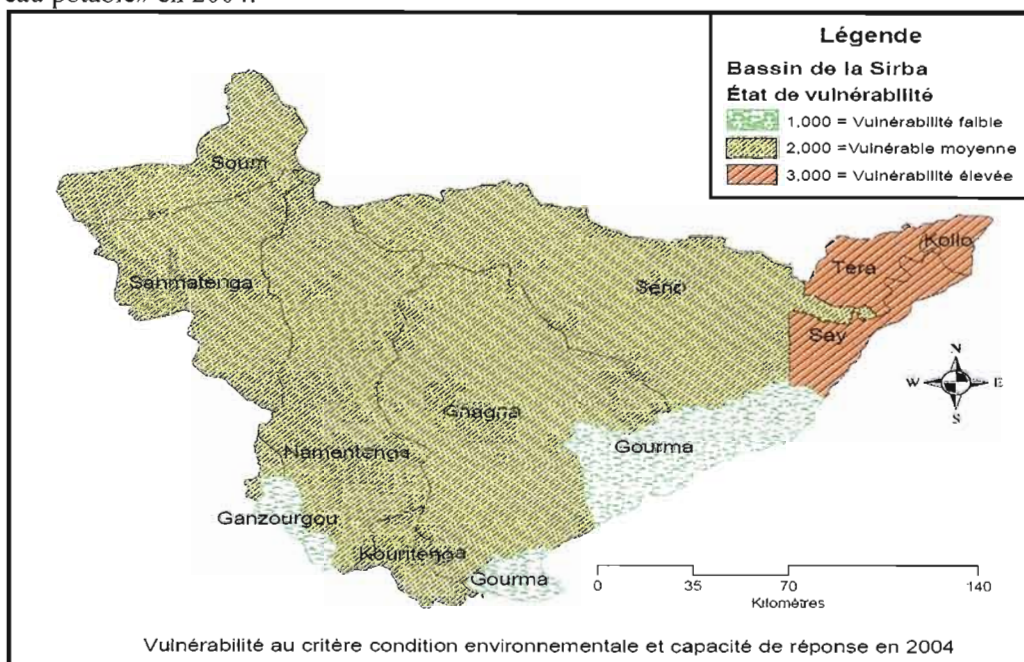


Figure 5.17 Carte de vulnérabilité des provinces au critère «Condition environnementale et capacité de réponse» en 2004.

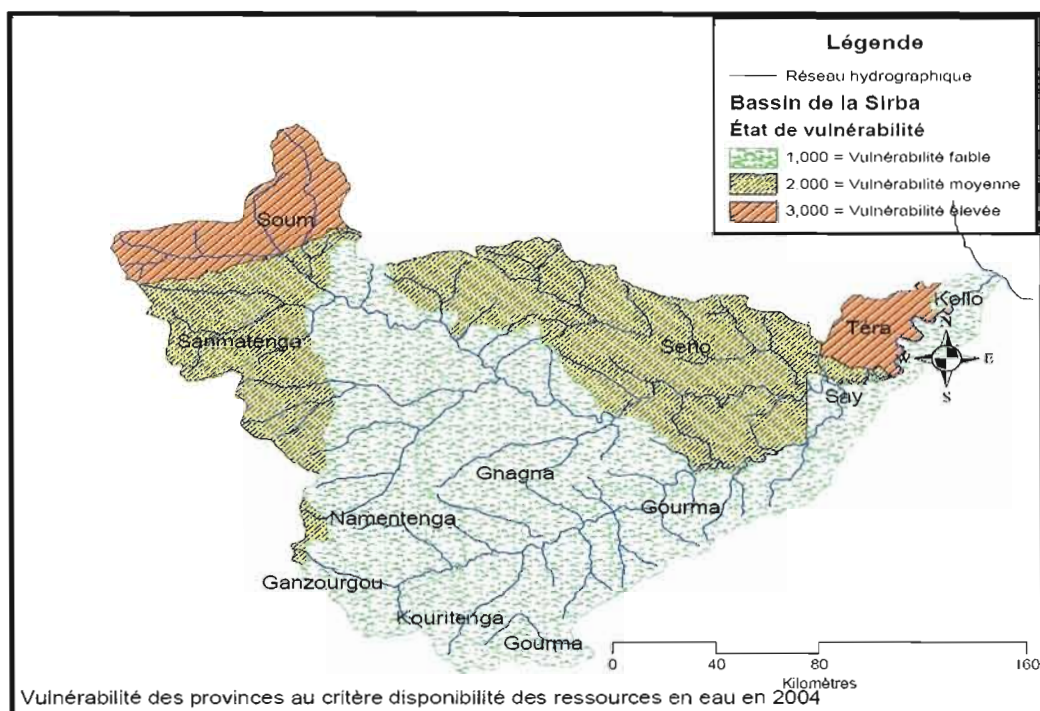


Figure 5.18 Carte de vulnérabilité des provinces au critère «Disponibilité des ressources en eau» en 2004.

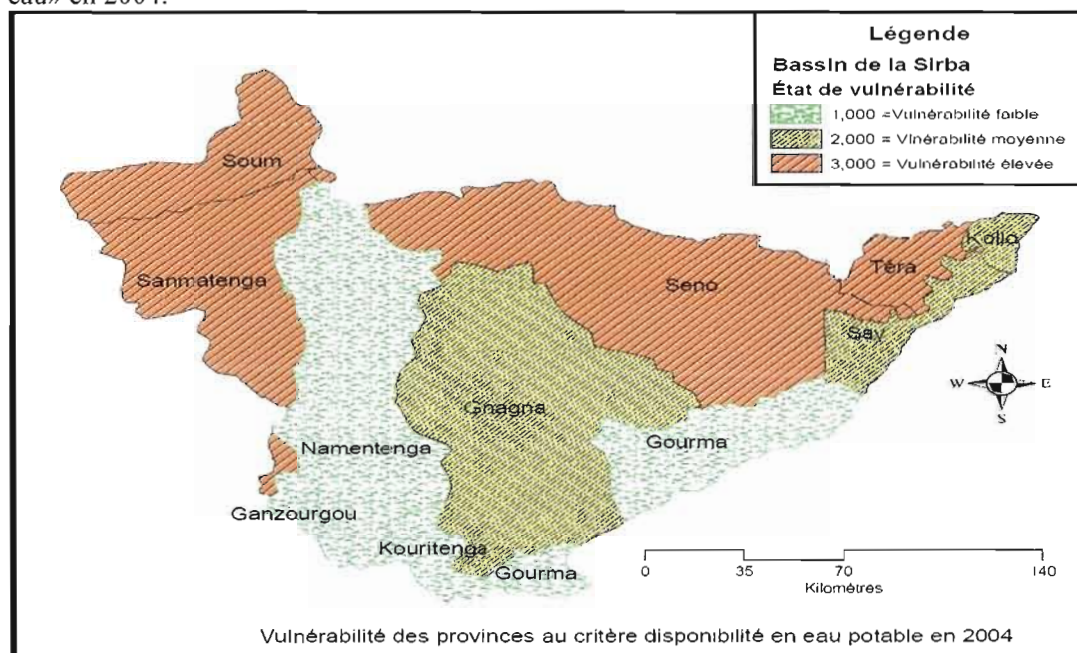


Figure 5.19 Carte de vulnérabilité des provinces au critère «Disponibilité en eau potable» en 2004.

5.3.1 Vulnérabilité des provinces aux critères : «Condition environnementale et capacité de réponse», «Disponibilité des ressources en eau» et «Disponibilité en eau potable» en 1984

D'après la figure 5.8, 45,5 % des provinces présentent une vulnérabilité faible au critère «Condition environnementale et capacité de réponse», tandis que 9,1 % et 45,5 % ont une vulnérabilité moyenne et élevée respectivement. La figure 5.9 montre que les provinces les plus vulnérables à ce critère sont situées au nord est dans la partie nigérienne dont les départements Kollo, Say et Téra et au nord ouest du bassin de la Sirba dont la province de Soum et Sanmatenga. Par contre la figure 5.8 montre que 54,2 % des provinces ont une vulnérabilité faible et 36,4 % moyennement vulnérables et seulement 9,1 % présentent une vulnérabilité élevée au critère «Disponibilité des ressources en eau». La figure 5.10 indique que la province de Soum est la plus vulnérable par rapport à ce critère. Quant au critère «Disponibilité en eau potable», la figure 5.8 indique que 36,4 % des provinces sont moins vulnérables, 18,2 % et 45,5 % ont une vulnérabilité moyenne et élevée respectivement. D'après la figure 5.11, les provinces de Sanmatenga et Soum ainsi que les départements de Kollo, Say et Téra sont les plus vulnérables.

5.3.2 Vulnérabilité des provinces aux critères : «Condition structurelle qualité de l'environnement», «Condition environnementale et capacité de réponse» et «Disponibilité en eau potable» en 1994

D'après la figure 5.12, 36,4 % des provinces étaient moins vulnérables, 36,4 % étaient vulnérables et 27,3 % étaient très vulnérables au critère «Condition structurelle et qualité de l'environnement». La figure 5.13 montre que les provinces les plus touchées sont celles de Soum, Sanmatenga, Seno et les départements de Kollo, Say et Téra. La figure 5.12 montre également que 45,5 % et 27,3 % des provinces étaient respectivement vulnérables et très vulnérables au critère «Condition environnementale et capacité de réponse». À part la partie sud du bassin qui est moins vulnérable, toutes les provinces situées au nord est et nord ouest sont vulnérables à ce critère en particulier celles de Soum et Téra (cf. figure 5.14). Quant au critère «Disponibilité en eau potable», 36,4 % des provinces affichent une vulnérabilité faible, tandis que 36,4 % et 27,3 % présente une vulnérabilité moyenne et élevée (cf. figure 5.15).

5.3.3 Vulnérabilité des provinces aux critères : «Condition environnementale et capacité de réponse», «Disponibilité des ressources en eau» et «Couverture des besoins en eau potable» en 2004

L'observation de la figure 5.16 montre que 54 % des provinces étaient vulnérables et 27,3 % étaient très vulnérables au critère «Condition environnementale et capacité de réponse» en 2004. La figure 5.17 indique que seuls les provinces de Gourma et Kouritenga étaient moins touchées (18,2 %). La figure 5.16 indique aussi que les provinces qui présentent une faible vulnérabilité au critère «Disponibilité des ressources en eau» sont les plus nombreuses (72 %) contre 18,2 % et 9,1 % de provinces vulnérables et très vulnérables respectivement (cf. figure 5.18.) Par contre la figure 5.19 indique que les provinces restent encore vulnérables et très vulnérable au critère «Disponibilité en eau potable».

En résumé, la vulnérabilité des provinces au critère «Condition environnementale et capacité de réponse», s'est accentuée au cours des trois années étudiées (1984, 1994 et 2004) avec les pourcentages de provinces vulnérables et très vulnérables qui s'élevaient à 54,6 % en 1984, 72,8 % en 1994 et 81,6 % en 2004. Il faut signaler que le critère «Condition environnementale et capacité de réponse» caractérise l'état de santé de l'environnement suite à la variabilité du régime des précipitations et également à l'extension continue des activités anthropiques pour assurer la subsistance de la population sans cesse croissante (i.e. section 4.2 du chapitre 4). Ce critère caractérise également la capacité de réponse ou d'adaptation des populations du bassin pour faire face à ces changements environnementaux.

Ces changements d'ampleur dans la contribution de ce critère à la vulnérabilité s'expliquent par le fait que l'année 1994 se trouve dans la décennie 1990, au cours de laquelle la pluviométrie moyenne saisonnière s'est rapprochée de la moyenne normale climatique (1961-1990), comparativement à celle des années 1980, qui était de loin inférieure à la normale. Les effets bénéfiques de cette amélioration des conditions hydriques ont été observés sur l'indice de végétation et en particulier en considérant les formations arborescentes telles qu'analysées à la section 4.2 du chapitre 4. Cependant la capacité de réponse des populations n'a pas suivi le même rythme d'évolution que les facteurs environnementaux, à cause des facteurs structuraux, tels que l'accroissement de population, des personnes en charge et l'accès aux soins de santé (cf. tableau 5.11) qui constituaient le

premier critère de vulnérabilité des populations en 1994. En conséquence, l'état de vulnérabilité s'est répandu sur la majorité du bassin (cf. figure 5.17) en 2004. La vulnérabilité des provinces par rapport à la disponibilité des ressources en eau est nettement atténuée à cause de l'augmentation des pluies au cours de la décennie 1994-2004, mais également à cause des efforts consentis dans la mobilisation des ressources en eau par le gouvernement burkinabé.

5.4 Discussion

Il s'agit dans cette section d'analyser la vulnérabilité des populations face aux critères «condition environnementale et capacité de réponse», «disponibilité des ressources en eau» et la «disponibilité en eau potable des populations», afin de tirer les conclusions et recommandations utiles à l'élaboration de stratégie d'adaptation ou d'atténuation de la vulnérabilité des populations face à la variabilité et aux changements potentiels du climat.

5.4.1 Analyse de la vulnérabilité au critère «Condition environnementale et capacité de réponse»

Contrairement à notre problématique de départ qui avait mis l'accent sur le déficit hydrique comme principale cause de la vulnérabilité des populations à la variabilité climatique, les résultats de notre recherche montrent que c'est la dégradation des conditions environnementales et la capacité dont disposent les populations pour y faire face qui posent le plus de problèmes. Selon l'interprétation des résultats, le critère «Condition environnementale et capacité de réponse» est de loin celui qui explique mieux la vulnérabilité des populations avec de 49,5 % des 85 % restitués par le modèle en 1984, 48 % sur 82 % en 1994 et 50 % sur les 84 % en 2004. La vulnérabilité étant décrite comme facteur d'exposition, de sensibilité et de capacité adaptative. Nous pouvons affirmer que ce critère correspond à cette définition. En considérant les indices impliqués (indices climatiques, environnementaux et socioéconomiques), la vulnérabilité des populations au critère «Condition environnementale et capacité de réponse» peut être définie comme une condition dynamique incluant des éléments environnementaux et humains exposés aux conditions contrastantes extrêmes de la nature (Turner *et al.*, 2003).

D'après les résultats de l'analyse spatiale sur les trois années caractéristiques étudiées le pourcentage de provinces vulnérables au critère «Condition environnementale et capacité de réponse» a doublé, de 27,2 % en 1984 à plus de 54,6 % en 2004. Cela signifie que même si la plupart des auteurs (Nicholson *et al.*, 2001) font état des fins probables de la sécheresse, des années 1970 et 1980, l'environnement du bassin ne semble pas recouvrer sa physionomie des années 1950 et du début des années 1960. L'augmentation relative des précipitations n'a pas entraîné une amélioration notable dans les conditions environnementales du bassin ainsi que de la capacité d'adaptation des populations (Eklundh et Olsson 2003 ; Hountondji *et al.*, 2004). C'est pourquoi, les populations du bassin continuent d'être vulnérables à ce critère. Pour comprendre cette persistance de la vulnérabilité des populations sur l'ensemble du bassin, nous avons analysé le critère sous ses deux aspects : dégradation des conditions environnementales et capacité de réponse.

a) Phénomène de dégradation des conditions environnementales

La dégradation de l'environnement dans le contexte local est une mesure de l'état actuel du bassin par rapport à celui d'une période de référence (1961-1969). Si dans les pays du Nord, l'essentiel des problèmes environnementaux découle des conséquences de l'industrialisation et se manifeste à travers la pollution, les émissions de gaz à effet de serre et pluies acides, en Afrique sahélienne par contre, ce sont les conséquences de la gestion anarchique des systèmes et des techniques de production, ainsi que la récurrence de la sécheresse qui constituent le problème environnemental majeur. Celles-ci se manifestent sous la forme d'un phénomène de dégradation continue des terres (Ouellet et Gagne, 1992). Ces modifications de l'environnement posent de graves problèmes d'équité entre les différentes communautés quant à la disponibilité et l'accessibilité aux ressources. Par conséquent, l'augmentation du pourcentage de provinces vulnérables au critère «Condition environnementale et capacité de réponse» s'explique d'une part, par la persistance de la sécheresse qu'ont connue les populations du bassin dans les années 1970 à 1990 et d'autre part par les activités anthropiques.

b) Effet de la variabilité climatique sur la vulnérabilité des populations

Les résultats d'analyse de la variabilité des indices pluviométriques au cours de la période 1961-2004, révèlent que les pluies sont mal réparties au cours de l'année et sur l'ensemble du bassin. Or, l'agriculture pluviale est la seule source de survie des populations rurales du bassin de la Sirba. D'après les résultats d'analyse du régime des précipitations sur le bassin, les pluies utiles se concentrent entre les mois de juin à septembre. L'irrégularité constatée dans le régime de distribution des pluies durant la période pluvieuse compromet les récoltes surtout, lorsque les séquences sèches deviennent de plus en plus longues. Durant les décennies 1970-1980, les contributions mensuelles des précipitations saisonnières (juillet, août septembre) ont fortement baissé, avec une diminution de 33 à 30 % pour le mois de juillet 12 à 7 % pour le mois d'août et jusqu'à 29 % pour le mois de septembre par rapport à la moyenne normale (1961-1990). Les agriculteurs doivent suivre l'évolution des pluies au cours de la période culturale pour effectuer les principaux travaux champêtres (semis, sarclage et récolte).

Les résultats de l'analyse de l'évolution de la production agricole et de la pluviosité indiquent qu'il existe des liens entre les indices pluviométriques et la production par habitant. Ainsi, les précipitations extrêmes (maximum de précipitations en trois jours consécutifs et 90^e centile de précipitations) expliquent en moyenne 45 % des variances de la production par habitant dans les provinces de Ganzourgou, Gnagna, tandis que la variabilité de la fréquence des pluies extrêmes (nombre de jours de précipitations supérieur au 90^e centile) exprime plus de 50 % de la variance de la production dans les provinces de Gourma et Say. C'est seulement dans la province de Sanmatenga où la production dépend de la quantité totale mensuelle des pluies avec 60 % de la variance expliquée.

C'est pourquoi, malgré le retour des pluies à la moyenne normale, les rendements restent toujours dérisoires. L'état de vulnérabilité a gagné du terrain sur près de 81 % du bassin en 2004. Cependant, la réduction de 10 % (36,4 à 27,3 %) du pourcentage de provinces très vulnérables au critère «Condition environnementale et capacité de réponse» entre 1994 et 2004 est un signe encourageant. Elle indique la réversibilité des tendances qui ont conduit le bassin dans un processus de sécheresses récurrentes et de dégradation croissante des terres, mais elle est surtout liée aux stratégies d'adaptation (aide alimentaire,

diversification des sources de revenu, adoption de cultures à cycle court, élevage de petits ruminants). Cependant, ces stratégies n'ont pas pu empêcher la tendance inverse c'est à dire le passage à la pauvreté de provinces qui étaient moins vulnérables.

c) Effet de la pression anthropique sur la vulnérabilité des populations

L'évolution de l'occupation des sols du bassin de la Sirba laisse croire que la variabilité dans le régime des précipitations observées depuis le début des années 1970 et 1980, a profondément affecté la production alimentaire et le renouvellement des ressources végétales. Si cette variabilité des pluies saisonnières est en partie responsable de la diminution du couvert végétal de la zone sahélienne en général, il n'en reste pas moins vrai que les activités anthropiques contribuent à la destruction des ressources naturelles.

Comme examiné plus haut, l'économie du bassin de la Sirba est dominée par l'agriculture pluviale et l'élevage. Le manque de capital et de protection sociale, amène les populations, dont la subsistance dépend de la terre, à surexploiter celle-ci au détriment du couvert végétal naturel (agriculture itinérante). La dégradation qui en découle compromet souvent la stabilité et la viabilité à long terme des ressources naturelles dans leur ensemble. Ces problèmes sont exacerbés par l'augmentation de la population qui se traduit nécessairement par une hausse de la demande d'aliments, nécessitant un accroissement de la productivité (rendement à l'hectare) ou de la production (superficie cultivée). Dans la plupart des cas, les sociétés choisissent d'accroître les superficies cultivées, en ayant souvent recours à des terres marginales ou fortement susceptibles d'être dégradées à la suite de quelques années de culture. Cette pression anthropique a conduit à la réduction des périodes de jachères et à la culture permanente des terres. Ces méthodes d'exploitation et de gestion anarchique ont aggravé la dégradation de la ressource naturelle, en entraînant la diminution de la fertilité des sols et les rendements agricoles et d'élevage et par conséquent à une diminution de leur capacité de réponse. Ce phénomène a attiré l'attention de nombreux chercheurs (Vierich et Stoop, 1990; Somé *et al.*, 1992; Cleaver et Schreiber, 1994; Bationo *et al.*, 1998 ; Breman, 1998; Gruhn *et al.*, 2000) qui ont mis en évidence l'ampleur des changements environnementaux en lien avec la vulnérabilité des populations dans les régions sahélienne.

Comme suggéré par Mortimore et Adams (20001), la grande sécheresse du Sahel dans les années 1972-74, a été perçue non seulement comme une période de déficit chronique des ressources hydriques, de sécheresse et de crise de production alimentaire, mais également comme un échec à la fois des systèmes de production et des stratégies d'adaptation pour y faire face. Les travaux de Lepage *et al.* (2007), font état de la perception des populations sur les modifications de l'environnement survenues dans le bassin au cours des trois dernières décennies. Selon cette étude 80,2 % des répondants mentionnent la rareté des pluies et la disparition de l'eau de surface, 89 % confirme la disparition de la forêt et de la faune et seulement 45,1 % parlent de poussée démographique et d'augmentation du nombre d'animaux. Cependant, tout système d'exploitation agricole ou pastoral ne peut être durable que dans la mesure où la reconstitution régulière des ressources productives est possible. Or, les conditions d'une telle viabilité sont de moins en moins bien assurées dans nombre de situations agraires de la région soudano-sahélienne (Blein, *et al.*, 2001). La dégradation du milieu biophysique et la politique de gestion des ressources agricoles sont les facteurs essentiels de la vulnérabilité des populations du bassin face à la variabilité climatique des dernières décennies. Cette colonisation agricole est plus intense dans la partie soudanaise du bassin, c'est dire à la lisière entre savane et forêt qui, pour beaucoup d'auteurs est devenue de plus en plus peuplée.

5.4.2 Capacité de réponse et vulnérabilité structurelle des populations

La capacité de réponse ou capacité d'adaptation à la variabilité climatique est le processus par lequel les populations ou les états non seulement réduisent les effets nuisibles du climat sur leur santé et leur bien-être, mais encore tirent profit de leur nouvel environnement (Burton *et al.*, 2002; Huq *et al.*, 2003). D'après les résultats de la caractérisation socioéconomique, la faible capacité d'adaptation des populations est liée à leur grande pauvreté. Près de 46 % des populations vivent en dessous du seuil de pauvreté dans les communautés rurales (INSD, 1996a). L'économie du bassin dépend fortement des cultures pluviales, les autres secteurs économiques locaux étant limités et peu diversifiés. Ce secteur primaire représente 70 % de la valeur totale des exportations et 30 % du Produit Intérieur Brut (INSD, 1996a). Ainsi, la vulnérabilité du secteur agricole et de l'insécurité alimentaire récurrente sont liées à la faiblesse de la capitalisation de l'agriculture en termes de moyens de production, des infrastructures rurales, des institutions, des ressources humaines,

des marchés et des échanges. La stratégie de production de la plupart des populations est dans ce contexte essentiellement orientée vers la minimisation des risques en diversifiant les types de production végétale et animale.

Les possibilités de formation et les centres de conseil font défaut pour les paysans, alors que la possibilité de recevoir des crédits, grâce auxquels ils pourraient acquérir les engrais, les semences et les appareils nécessaires à l'augmentation de leur production, fait défaut. Or, selon le quatrième rapport du GIEC (2007), des années consécutives de sécheresse et les perturbations générales qui s'en suivent affaiblissent la capacité des sociétés à faire face à ce genre d'évènement réduisant la ou les périodes de temps nécessaire pour un autre aléa climatique. Les structures traditionnelles sont incapables de produire suffisamment pour satisfaire la demande du marché et s'adapter aux besoins d'une société face aux changements environnementaux. D'où l'augmentation progressive du nombre de provinces vulnérables au critère «Condition environnementale et capacité de réponse» durant les deux décennies de sécheresse. Ces déficits d'adaptation aux aléas climatiques montrent que l'agriculture de subsistance n'est plus viable puisqu'elle n'est pas capable de compenser les pertes de nutriments par des apports d'intrants extérieurs (engrais) afin de maintenir la production, ou à plus forte raison pour l'augmenter (Ruttan, 1998). En outre, l'absence d'un environnement sécurisant (sécurité publique), l'insuffisance des infrastructures socio-économiques (écoles, marchés, dispensaires, moyens de transport etc.) ainsi que l'enclavement de certaines zones accentuent la pauvreté des populations et réduisent leur capacité de réponse aux défis climatique.

5.2.3 Analyse de la vulnérabilité à la disponibilité des ressources en eau

Le pourcentage de provinces vulnérables et très vulnérables aux critères «Disponibilité des ressources en eau » et « Couverture des besoins en eau potable» est faible (27 % en moyenne). Ceci s'explique d'une part, par les efforts consentis par l'État et les organisations non gouvernementales dans la mobilisation des ressources en eau pour faire face à la pénurie d'eau liée à la récurrence de la sécheresse. Ces stratégies d'adaptation qui sont surtout axées sur la gestion de l'eau dans les villages, l'aménagement et la construction des barrages et des retenues d'eau ont eu un impact positif sur la réduction de la vulnérabilité des populations. Par ailleurs, l'augmentation de l'écoulement suite à la dégradation du

couvert végétal a contribué au renforcement du ruissellement au détriment de l'infiltration (L'Hôte *et al.*, 2003). L'augmentation de l'écoulement n'a pas pu empêcher le tarissement du cours d'eau durant la saison sèche, alors que le niveau des nappes d'eau souterraines est bas.

En effet, après deux décennies de sécheresse, le retour à des débits plus soutenus en saison sèche suppose une reconstitution des aquifères. Ceci ne peut être immédiat, l'incidence d'une meilleure pluviométrie sur le débit a aussi été réduite ou décalée dans le temps, conduisant éventuellement au tarissement des principaux affluents du Niger malgré le retour à des années plus humides. Selon Olivry (1996), il n'y a pas de concordance entre les variations des indices pluviométriques et celles du coefficient de tarissement, du fait que les réactions sont plus lentes dans la restitution des basses eaux. Le retour aux hautes eaux de la période humide nécessite plusieurs années dans la mesure où les précipitations continueront à croître. Il faut signaler que la vulnérabilité des provinces par rapport au critère « Couverture des besoins en eau potable » s'est beaucoup améliorée grâce aux investissements consentis dans la construction d'infrastructures hydrauliques.

CONCLUSION

Cette recherche se voulait une contribution à l'identification des facteurs déterminants de la vulnérabilité des populations du bassin de la Sirba vis-à-vis de la ressource en eau. Deux types de démarche ont été utilisés dans la réalisation de cette étude. La première consistait à la collecte d'informations d'origines diverses afin d'identifier les aspects environnementaux, socio-économiques et institutionnels susceptibles de caractériser l'état de vulnérabilité ou de résilience de la population du bassin de la Sirba face à la variabilité et aux changements climatiques. La seconde étape était axée sur le regroupement de l'ensemble des facteurs identifiés pour la définition des critères. Les résultats de l'étude ont montré que le bassin a connu d'importants changements tant d'ordre climatique qu'environnemental durant la période 1961-2004.

L'analyse des indices pluviométriques sur la période 1961-2004 a permis de mettre en évidence la variabilité du régime des précipitations moyennes (mensuelles et annuelles) par rapport à la moyenne normale 1961-1990. La contribution des précipitations moyennes mensuelles de ces mois au cumul annuel a diminué au cours de la décennie de 1980-1989. La tendance à la baisse observée sur les indices pluviométriques indique que le nombre d'événements pluvieux est à la baisse ainsi que l'occurrence des indices extrêmes, soit le maximum de précipitations en trois jours consécutifs et le nombre de jours de précipitations supérieur au 90^e centile de précipitation. En plus, le maximum de jours consécutifs secs est à la hausse durant les mois de mai, juin et septembre. Ce qui fait que les épisodes de sécheresses sont plus fréquents durant les périodes de semis, et de maturité des cultures causant ainsi des pertes de récoltes.

L'irrégularité de la répartition des pluies saisonnières se reflète sur l'écoulement de la Sirba et ses affluents. Ce déséquilibre se caractérise par la baisse généralisée des écoulements de surface, de 20 à 50% par rapport à la moyenne 1963-1990 avec des étiages parfois sévères allant jusqu'à l'arrêt des écoulements. Il a été constaté que les meilleures années pluviométriques ne correspondent pas souvent à de bonnes années hydrologiques. Ce phénomène se manifeste par des retards des périodes de crue, liés à l'intermittence des pluies

au milieu de la saison humide. La variabilité climatique conjuguée à la pression anthropique et les techniques de production (agriculture, élevage), ont engendré un déséquilibre écologique profond dans le bassin hydrographique de la Sirba affluent de droite du Niger.

De fortes similitudes ont été identifiées entre l'évolution saisonnière de l'indice normalisé de végétation et celle des précipitations au cours de l'année, avec un décalage de 10 jours en moyenne par rapport à celles-ci. La variabilité interannuelle de l'indice normalisé de végétation sur la période 1990-1999 indique une augmentation des valeurs. Toutefois, cette amélioration de la qualité de la biomasse ne compense pas la forte anthropisation du milieu à cause de l'augmentation du taux d'occupation des terres par les activités agropastorales. D'autres problèmes tels que la pollution de l'eau et les maladies hydriques, ont été analysés. L'exemple du district sanitaire de Boulssa indique que les maladies comme le paludisme, la diarrhée et la schistosomiase sont très fréquentes et leur évolution est en lien avec celle des précipitations au cours de l'année. Le plus grand nombre de cas étant signalé en début et la fin de la période humide en ce qui concerne la schistosomiase et la diarrhée. Par conséquent, toute modification dans le régime des pluies pourrait avoir des effets sur la fréquence de ces maladies qui affectent la santé publique des populations du bassin.

Par ailleurs, les résultats ont permis de confirmer que les conditions environnementales ne sont pas les seules responsables de la vulnérabilité des populations, mais que les conditions socio-économiques y ont leur part. L'agriculture pluviale qui est la pratique dominante des activités économiques est basée sur la production de subsistance, mal adaptée à la variabilité du régime des pluies. La pauvreté de la population fait que les investissements dans ce secteur sont faibles. Le modeste rendement à l'hectare (250 à 500 kg de céréale) ne parvient pas à couvrir les besoins alimentaires de la famille. De plus, le taux élevé d'analphabètes représente un frein à la vulgarisation des techniques d'amélioration des rendements. La vulnérabilité sociale se caractérise sur le bassin par l'insuffisance des services de base. Le taux moyen d'accès à l'eau potable se chiffre à 60 %, alors que celui de l'accès aux soins de santé oscille entre 10 à 20 % sur l'ensemble du bassin. Les taux de scolarité varient de 30 % à 45 %.

Les résultats du croisement des principaux indices de vulnérabilité identifiés ont été réalisés à l'aide de l'analyse en composantes principales. Les trois structures factorielles modèles (1984, 1994 et 2004) obtenues après rotation *Oblimin* ont dégagé trois critères principaux qui expriment respectivement 85,5 %, 82,4 % et 84,4 % de la variance de la vulnérabilité des populations. Les premiers critères regroupent les plus importants indices qui caractérisent l'état de vulnérabilité des populations. Ainsi, le critère «Condition environnementale et capacité de réponse» pour ce qui concerne les modèles de 1984 et 2004 et le critère «Condition socio-structurelle et qualité de l'environnement» pour le modèle de 1994 expliquent 49,5 % (1984), 48% (1994) et 50 % (2004) de la variance restituée par les modèles. Les deux autres critères «Disponibilité des ressources en eau» exprime 21, % tandis que la « Couverture en eau potable » explique environ 14, % en 1984, 15 % en 1994 et 12, % en 2004. Il existe une différence marquée de la vulnérabilité par rapport aux différents critères selon la période et les provinces. Le nombre de provinces vulnérables au critère «Condition environnementale et capacité de réponse», qui se situait à 27,3 % en 1984, a doublé en 2004 pour se retrouver à 54,4 %, alors que les provinces deviennent de moins en moins vulnérables aux critères «Disponibilité des ressources en eau» et «Couverture des besoins en eau potable» de 1984 à 2004.

Dans le contexte local du bassin de la Sirba, la persistance de la vulnérabilité des populations vis-à-vis du critère «Conditions environnementales et capacité de réponse» est très remarquable, malgré les stratégies d'adaptation déployées par les gouvernements Burkinabé et Nigérien, ainsi que les communautés et les individus pour faire face aux changements environnementaux. Ceci signifie que les indices environnementaux et les facteurs socio-économiques sont inter-reliés et que certains facteurs endémiques limitant de nature socio-économique engendrent des conséquences sur les prix des denrées alimentaires, le commerce interrégional, les flux migratoires et du taux d'endettement des paysans. Ces aspects sont difficilement cernables quantitativement, faute d'informations fiables à l'échelle locale et ainsi n'ont pas été abordés dans le cadre de notre étude. Ils constitueraient une piste de recherche pertinente afin de permettre l'acquisition d'informations complémentaires à l'analyse systémique de la vulnérabilité des populations face la variabilité des climats. Ceux-ci signifient que ce critère a des liens avec d'autres facteurs endémiques de nature socio-

économique à l'échelle nationale, régionale et internationale notamment : le prix des denrées alimentaires, le commerce interrégional, les flux migratoires, le taux d'endettement des pays etc. sont entre autres des facteurs à l'origine de cette persistance de la vulnérabilité des populations.

Cette recherche a permis de développer une approche basée sur l'utilisation des indicateurs quantifiables, d'élaborer des indices synthétiques et d'utiliser des techniques d'intégration et d'interprétation de données afin de définir des critères de vulnérabilité. Cependant, l'approche utilisée présente des limites notamment, dû au manque de couverture spatiale et de l'hétérogénéité temporelle des données utilisées (i.e. tableau 2.3 chapitre II). Ainsi, l'analyse de la vulnérabilité a été réalisée au niveau des provinces et départements durant trois années (1984, 1994 et 2004). Elle offre toutefois l'avantage de placer la vulnérabilité des populations au changement climatique dans une dynamique environnementale, socio-économique et institutionnelle.

RECOMMANDATIONS

La réduction de la vulnérabilité des populations face à la récurrence des épisodes de sécheresse constitue un enjeu majeur qui concerne tous les acteurs des pays sahéliens, depuis le paysan jusqu'au pouvoir public. L'atteinte de cet objectif passe par une conscience partagée du risque ainsi que de sa gestion efficace. Plusieurs stratégies ont été adoptées par les pays sahéliens et les institutions internationales. Ces stratégies sont essentiellement basées sur l'adaptation aux nouvelles conditions écologiques créées par la variabilité du climat. Par rapport aux trois critères identifiés, il s'agit de :

1. Renforcer les capacités de recherche des pays sahéliens sur la nature des changements du climat et la vulnérabilité des populations;
2. Adopter des stratégies de gestion des risques liées à la variabilité du climat et de restaurer les ressources naturelles (sol, eau et végétation) afin de freiner leur dégradation;
3. Renforcer les capacités institutionnelles afin de favoriser la disponibilité et l'accès aux ressources d'eau pour des besoins agricoles et domestiques.

1. Renforcement de capacité de recherche

Une meilleure connaissance à court et long terme des ressources en eau disponible dans le temps et dans l'espace serait utile notamment pour améliorer les informations quantitatives. À cet effet, le CILSS apporte une contribution significative, grâce à l'appui à la recherche et à la formation ainsi qu'au renforcement du réseau de collecte de données. Ces actions doivent être soutenues par le renforcement des actions de réhabilitation des réseaux d'observation existantes et l'extension des stations de mesure à des échelles plus fines. Ceci doit également passer par l'amélioration et le renforcement des capacités des structures nationales existantes de conservation, de protection et de gestion de l'eau. Si les actions du CILSS ont été longtemps axées sur la prévention du risque climatique à travers son Projet Alerte Précoce, son rôle dans les actions de réduction de la vulnérabilité des populations sahéliennes est aujourd'hui reconnu par tous. Par exemple, le Projet d'Appui aux capacités d'adaptation aux changements climatiques a permis l'élaboration des bases scientifiques nécessaires pour développer les stratégies de réduction de la vulnérabilité dans les pays du CILSS. Il pose les bases méthodologiques nécessaires à l'évaluation de la vulnérabilité, afin d'accroître les connaissances sur le régime des précipitations à l'échelle des événements

pluvieux (Gachon *et al.*, 2007), au diagnostic de la dynamique locale de la vulnérabilité et adaptation des populations sahéniennes aux changements climatiques (Lepage *et al.*, 2007). La présente étude a permis d'identifier plus précisément les critères de vulnérabilité des populations du bassin de la Sirba. Dans le processus de réduction de la vulnérabilité, ces résultats doivent aider les décideurs à prioriser le critère «Conditions environnementale et capacité de réponse» qui caractérise le plus la vulnérabilité des populations sahéniennes aux changements climatiques.

2. Adoption des stratégies de gestion des risques

La vulnérabilité persistante des populations au critère «Conditions environnementale et capacité de réponse» est un signe évident de la perpétuation de la dégradation des ressources naturelles d'une part et d'autre part à la pauvreté de la majorité de la population suite à la récurrence de la sécheresse au cours de la décennie 1970 et 1980. Pour atténuer ce phénomène il faudra promouvoir les pratiques écologiques, via les centres de recherche et les universités en réorientant la recherche agricole en fonction de l'évolution des conditions de production (climats, sol) et réduire l'endettement et la pauvreté des populations.

a) Sur le plan environnemental

L'agroforesterie par exemple, regroupe un ensemble de pratiques faisant appel aux domaines agricole et forestier afin de maximiser l'utilisation du territoire tout en offrant un éventail d'avantages environnementaux, économiques et sociaux. Elle offre des possibilités comme mode de diversification des revenus, comme mode de gestion innovateur des terres, et comme moyen de répondre aux enjeux environnementaux de qualité de l'eau, du changement climatique et de protection de la qualité des sols. L'agroforesterie donne un éventail de solutions à bien des enjeux environnementaux tels que la réduction de l'albédo, le renforcement de l'humidité de l'air et la convection. De même, elle peut offrir un potentiel élevé en matière de création d'emplois et de développement économique régional. La prise en considération de cette méthode de gestion des terres dans les nouvelles politiques agricoles aiderait à long terme à la reconstitution du patrimoine naturel.

b) Sur le plan agricole

Plusieurs techniques sont utilisées afin de réhabiliter les terres dégradées et améliorer leur rendement, comme le Zai, les demi-lunes, le paillage avec l'appui de la FAO et des ONG. Ces techniques comportent également l'utilisation de semences sélectionnées et de variétés précoces de mil ainsi que des

variétés tolérantes à la sécheresse. Ces techniques ont fait leur preuve dans plusieurs communautés du bassin et la presque totalité des sites pilotes du projet d'appui à l'adaptation dans les pays sahéliens.

c) Sur le plan socio-économique

D'après les résultats de nos enquêtes, les paysans sont souvent confrontés à des besoins d'argent au moment de la récolte. Ce qui les oblige à vendre les produits agricoles non essentiels à l'alimentation à des prix bas à cause de la forte offre au moment de la récolte. Puis ces mêmes produits sont vendus à des prix élevés au moment de la soudure, ce qui amène l'appauvrissement et l'endettement des paysans. Face à cette situation, les paysans du village Dantchiandou dans la commune de Kollo au Niger ont créé l'UNION-FAKHAMAYE (qui signifie compréhension en langue locale). Les stratégies socio-économiques sont basées sur la création d'un cadre de concertation pour résoudre les conflits concernant la gestion des ressources naturelles, l'exode rural (en majorité jeunes) et procéder à des campagnes de vaccination du cheptel et le Warrantage. Le Warrantage est une organisation communautaire mis en place par l'UNION-FAKHAMAYE. C'est un système de dépôt d'une partie de la récolte, pour éviter de la vendre à vil prix et ainsi de le revendre plus tard à un meilleur prix. Ce système protège les paysans contre les usuriers. En plus ils peuvent obtenir des fonds pour mener d'autres activités génératrices de revenus et obtenir des intrants sur les bénéfices réalisés par l'union. La vulgarisation de ce système sur l'ensemble du bassin permettrait à long terme de renforcer la capacité d'adaptation des paysans à l'occurrence de la sécheresse par la diversification des sources de revenu ainsi que de la gestion durable des ressources disponibles.

3. Renforcement de la capacité institutionnelle

Les pouvoirs publics, les organisations paysannes et les associations doivent concentrer les efforts pour transformer l'agriculture de subsistance en agriculture commerciale, capable d'assurer la reproduction de la fertilité des sols par l'achat des intrants externes et assurer une croissance rapide du secteur agricole. Plusieurs auteurs estiment qu'un taux de croissance annuel de 4% du secteur agricole est nécessaire pour accroître les disponibilités alimentaires et stimuler une forte croissance économique permettant la création d'emplois et des revenus nécessaires à une amélioration de la sécurité alimentaire (Cleaver et Schreiber, 1994). Ce renforcement de capacité d'adaptation concerne également la valorisation des facteurs locaux de production (engrais, semences) : il s'agit par exemple de déterminer les méthodes les plus appropriées pour mieux gérer l'humidité du sol pendant les périodes critiques du développement des plantes; améliorer la fertilité des sols en vue d'accroître leur productivité par l'introduction d'espaces adaptées à la sécheresse. Ce processus qui doit aboutir à une production à grande échelle nécessite le développement

des marchés au niveau national et sous-régional et les échanges afin d'assurer des débouchés porteurs aux producteurs, stabiliser les prix et faciliter l'accès aux denrées pour les populations les plus démunies et garantir ainsi la sécurité alimentaire.

Les pouvoirs publics et les associations doivent favoriser l'accès pour tous à une eau potable et à des services essentiels dans les domaines de l'eau, de l'assainissement et de l'énergie et mobiliser les financements internationaux pour la réalisation des investissements de base dans les domaines correspondants à ces biens et services essentiels. Aussi, il est important de développer des infrastructures hydrauliques pour l'irrigation et les moyens de communication dans les zones rurales pour assurer la commercialisation des produits agricoles, en appuyant la mise en place d'équipements, de crédits, nécessaires à la revitalisation des pratiques traditionnelles de production.

RÉFÉRENCES

- Adger, W.N., N. Brooks, G. Bentham, M. Agnew et S. Eriksen. 2004. New indicators of vulnerability. Tyndall Centre for Climate Change Research: p.6-80.
- Adger, W.N. 1999. «Social vulnerability to climate change and extremes in Coastal Vietnam». *World Development*. vol. 27, p. 249-269.
- Adger, W.N. et P.M. Kelly. 1999. «Social vulnerability to climate change and the architecture of entitlements». (IPCC Special Issue on Adaptation to Climate Change and Variability). *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 4, no 3-4, p. 253-266.
- Allen, K. 2003. «Vulnerability reduction and the community-based approach». In *Natural Disasters and Development in a Globalising World*, Pelling, London: Routledge, p. 170-184.
- AP3A. 2001. *Le contexte de la vulnérabilité structurelle par système de production dans les pays du CILSS*. Niamey: CILSS, 98 p.
- Arnell, W.N. 2004. «Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios. ». *Global Environmental Change*, vol. 14, p. 31-52.
- Aubréville, A. 1949. *Climats, forêts, et désertification de l'Afrique tropicale* Société d'Éditions Géographiques, Maritimes et Coloniales. Paris, France, 267 p.
- Bagnouls, F. et H. Gaussen. 1953. *Saison sèche et indice xérothermique*. Bulletin Soc. Hist. de Toulouse, 88, p.193-240.
- Barrow, E., B. Maxwell et P. Gachon. 2004: Climate Variability and Change in Canada: Past, Present and Future, *ACSD Science Assessment Series No. 2*, Meteorological Service of Canada, Environment Canada, Toronto, Ontario, 114 p.
- Bationo, A., F. Lompo et S. Koala. 1998. «Research on nutrient flows and balances in West Africa: State-of-the-art». *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 71, no 1-3, p. 19-35.
- Baudouin, Y., Cavayas F. et Marois C. 1995. Vers une nouvelle méthode d'inventaire et de mise à jour l'occupation et de l'utilisation du sol en milieu urbain. *Journal canadien de télédétection*, vol. 21, n° 1, 1995, p. 28-42.
- Berger, A.R., W.J. Iams et A.A. Balkema. 1996. *Introduction to geoindicator checklist* no Geoindicators Assessing rapid environmental changes in earth systems. Rotterdam, p. 383-394.
- Blau, G., A. Paul et N.S. John. 1993. «On developing a general index of work commitment». *Journal of vocational Behavior*, vol. 42, no 3, p. 298-314.

- Blein, R., K. Traoré et E. Jeudy. 2001. «Améliorer la capacité sahéenne d'anticipation et de gestion de crises alimentaires majeures Contribution au débat. Version provisoire soumise à la réunion annuelle du Réseau de Prévention des Crises Alimentaires». 30 p.
- Bohle, H.G., T.E. Downing et M. Watts. 1994. «Climate change and social vulnerability: the sociology and geography of food insecurity». *Global Environmental Change*. Vol. 4, no 1, p. 37-48.
- Bonn, F. 1996. *Précis de télédétection Applications thématiques, volume no 2*. Paris: Presses de l'Université du Québec/UREF-AUPELF, 633 p.
- Boulain, N. 2004. Effet des facteurs climatiques et anthropiques dans l'évolution récente des écosystèmes tropicaux : modélisation spatialisée du bilan hydrique d'un petit bassin versant sahéen. PhD. Paris VI, Paris. 171p.
- Boulanger, P.M. 2004. Les indicateurs de développement durable : un défi scientifique, un enjeu démocratique. In *Les séminaires de l'IDDRI*, n°12, 24p.
- Boulanger, P.M., P.Y. Thomas, J. Van Assche et B. De Ridder. 2003. «Mesurer le développement durable en Belgique : quels rôles pour les processus participatifs ?». In *Rapport au Conseil fédéral du développement durable* (Avril): Technical report, IDD-CDO. En ligne. <[http : //www.iddweb.be](http://www.iddweb.be)>.
- Bourcier, A. 1994. «Télédétection et combinaison d'informations géographiques en mode image application à l'aménagement de l'estuaire de la Seine ». Rouen, Laboratoire de modélisation et traitements graphiques (MTG), URA 1351 du CNRS, Université de Rouen, 421 p.
- Bourlès, B. 2003. On the Gulf of Guinea and the West African Monsoon, CLIVAR Exchanges, Letters, n°27, vol. 8, n°2/3, CLIVAR-Africa, 15-16, septembre.
- Bouroche, J. et G. Saporta. 1987. *L'analyse des données*, Presses universitaires de France, no 1854. Paris : Collection que sais-je ? 127 p.
- Brédif, H. et P. Arnould. 2005. «Evaluer n'est pas gérer. Considérations pour rompre le pouvoir des critères et des indicateurs ». *Revue Forestière Française*, vol. 5, p. 485-502.
- Breiman, L., J.H. Friedman, R.A. Olshen et C.J. Stone. 1984. *Classification and Regression Trees*, Wadsworth and Brooks/Cole. Monterey, California, 358 p.
- Breman, H. 1998. «Amélioration de la fertilité des sols en Afrique de l'Ouest: Contraintes et perspectives». In *Soil fertility management in West African land use systems*, A. Neef G. Renard, K. Becker and M. von Oppen, Margraf Verlag: Weikersheim, p. 7-20.

- Burton, I. et B. Lim. 2005. *Adaptation policy frameworks for climate change: developing strategies, policies, and measures*. Cambridge University Press, New York, Cambridge, UK 30 p.
- Burton, I., B. Lim, S.S. Erika, E. Malone et S. Huq. 2004. *Adaptation policy frameworks for climate change: developing strategies, policies, and measures* Cambridge, UK. New York: Cambridge University Press, 266 p.
- Burton, I., S. Huq, B. Lim, O. Pilifosova et E.L. Schipper. 2002. «From impacts assessment to adaptation priorities: the shaping of adaptation policy». *Climate Policy*, vol. 2, p. 145-159.
- Burton, I., R. Kates et G.F. White. 1993. *The Environment as Hazard*, second ed. New York: Guilford Press, 290 p.
- Byrne, G.F., P.F. Crapper et K.K. Mayo. 1980. «Monitoring land-cover by principal component analysis of multitemporal, Landsat data». *Remote sensing of Environment*, vol. 10, p. 175-184.
- Chambers, R. 1989. Editorial introduction: Vulnerability, coping and policy. *Institute of Development Studies Bulletin*, n° 20, p. 1-7 p.
- Charney, J. 1975. Dynamics of deserts and droughts in the Sahel. *Quaternary Journal Royal Meteorology Society* 101, p. 193-202.
- Charney, J., W. Quirk, S. Chow et J.A. Kornfield. 1977. Comparative study of the effects of albedo change on drought in semi-arid regions. *Journal of Atmospher Sciences* 34, p. 1366-85.
- Centre Régional AGRHYMET. 2004. Système TBASE de données numériques. Niamey, Niger.
- CILSS. 2001. L'analyse de la prévision des zones a risque de la campagne 2000/2001 Au Burkina faso, Mali, Niger et Sénégal dans le contexte de la vulnérabilité structurelle. CESIA Accademia dei Georgofili. Florence, O.M.M Coopération Italienne: 30 p.
- Clark, G.E., S.C. Moser, S.J. Ratick, K. Dow, W.B. Meyer, S. Emani, W. Jin, J.X. Kasperson, R.E. Kasperson et H.E. Schwarz. 1998. «Assessing the vulnerability of coastal communities to extreme storms: the case of Revere, MA, USA. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 3, p. 59-82.
- Cleaver, K. M. et G. A. Schreiber. 1994. *Reversing the spiral: The population, agriculture, and environment nexus in sub-Saharan Africa*. Washington, D.C: World Bank. 293 p.
- Cunnane, C. 1978. «Unbiaised Plotting Position. A review». *Journal of hydrology*, vol. 37, p. 205-222.

- Cutter, S., J. Mitchell et M. Scott. 2000. «Revealing the vulnerability of people and Places: A case study of Georgetown County, South Carolina». *Annals of the Association of American Geographers*. vol. 90 no 4, p. 713 -737.
- Dabire, B. 2003. Etude sur les statistiques des migrations au Burkina Faso. Migration de main d'œuvre pour l'intégration et le développement en Afrique de l'Ouest. Ouagadougou, Projet OIT-UE RAF/02/M12/EEC, 34 p.
- Delate, K. et C.A. Cambardella. 2004. Rendement des agro-écosystèmes pendant la transition vers la production céréalière certifiée biologique *Agronomy Journal*, no 96, American Society of Agronomy p.1288-1298.
- Dembélé, N.N. 2001. Sécurité alimentaire en Afrique Subsaharienne : quelle stratégie de réalisation? Projet d'appui au système d'information décentralisé du marché agricole (PASIDMA). Bamako, Chambre d'Agriculture du Mali 25 p.
- Devineau, J.L. et G. Serpantié. 1991. Paysages végétaux et systèmes agraires au Burkina Faso. Caractérisation et suivi des milieux terrestres en région arides et tropicales. Deuxièmes journées de télédétection. Colloques et Séminaires. Bondy ORSTOM 373- 385 p.
- Diallo, M.A et S. Kaba. 1991. Analyse de débuts de la saison pluvieuse et des pluies quotidiennes au Mali 1950-1990. ICTP Report IC, 296 p.
- Djaby, B., T. Fillipis, B.P. Koné, A. Vignaroli et D. Vecchia. 1998. Méthodologie pour l'élaboration du front de végétation dans le cadre du système d'analyse conjoncturelle Alerte Précoce. Niamey, AGRHYMET, 21 p.
- DMC. 2000. DEKAD Report Ten-Day Bulletin. Nairobi, Kenya. Centre de suivi de la sécheresse, 19, 592 p.
- Downing, T.E., A. Patwardhan, R. Klein, E. Mukhala, L. Stephen, M. Winograd et G. Ziervogel. 2005. «Vulnerability assessment for climate adaptation». In *Adaptation Policy Framework for Climate Change: Developing Strategies, Policies and Measures*, Lim et Spanger-Siegfried, Cambridge, University Press, 24 p.
- Downing, T.E. 2003. «Linking sustainable livelihoods and global climate change in vulnerable food systems». *Die Erde*, vol. 133, p. 363-378.
- Downing, T.E., R. Butterfield, S. Cohen, S. Huq, R. Moss, A. Rahman, Y. Sokona et L. Stephen. 2001. «Vulnerability Indices: Climate Change Impacts and Adaptation». *United Nations Environment Programme Policy (UNEP)*, Nairobi. vol. 3. 25p.
- Downing, T.E. 1991. Assessing socio-economic vulnerability to famine: Frameworks, concepts and application. Providence,USA Report produced for the USAID/FEWS Project and Alan Shawn Feinstein World Hunger Program: 25 p.

- Dubois, J.M., F. Cavayas et P. Lafrance. 1993. *Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique* Presses de l'Université du Québec. Coll. «Actes des journées scientifiques». Sainte-Foy, Québec, Canada, 366 p.
- Dubreuil P. 1974. *Initiation à l'analyse hydrologique*, Masson et Cie et ORSTOM Ed. Paris, 216 p.
- Dubuisson, B. et J.M. Moisselin. 2006. «Valeurs rares et extrêmes de précipitations et de débits : évolution des extrêmes climatiques en France à partir des séries observées». Météo-France, Direction de la Climatologie La Houille Blanche, vol. 6, p. 1-6.
- Duchiron, B., et G. Beltrando. 2002. *Régionalisation de la pluviométrie sur l'espace riverain de l'océan Indien et prévision statistique à moyen terme*. Coll. «International Association of Hydrological Sciences». Wallingford, Royaume-Uni, IAHS Press, 518 p.
- Easterling, D. R., G. A. Meehl, C. Parmesan, S. A. Changnon, T. R. Karl, et L. O. Mearns. 2000. *Climate extremes: observations, modeling, and impacts*, Science, 289, 2068-2074.
- Eastman, J.R. et H. Jiang. 1996. Fuzzy Measures in Multi-Criteria Evaluation, Proceedings, Second International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Studies, May 21-23, Fort Collins, Colorado, p. 527-534.
- Eklundh, L. et L. Olsson. 2003. «Vegetation index trends for the African Sahel 1982-1999». *Geophysical Research Letters paper*, vol. 30, no 430, doi: 10.1029/2002GL016772.
- Elliott, F. 1996. «Eaux de surface eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali». *C. R. Géoscience*. vol. 330, p. 689-692.
- Evrard, Y., B. Pras et E. Roux. 2003. *Market. Etudes et recherches en marketing*, 3ème édition, Dunod. , no 3. Paris 34-75 p.
- FAO. 2000. «The challenges of sustainable forestry development in Africa». In *Twenty-first FAO regional conference for Africa, Yaounde, Cameroon* (21-25 February 2000): Food and Agriculture Organization, 16 p.
- FAO. 2002. Working with local institutions to support sustainable livelihoods. Rome, Food and Agriculture Organization: 20 p.
- Frich, P., L. V Alexander, P. Delta-Marta, B. Gleason, M. Haylock, A. M. Klein, G. Tank et T. Peterson. 2002. *Observed coherent change in climatic extremes during the second half of the twentieth century*, Climate Research, Vol 19, pp 193-212
- Füssel, H.M. et R.J.T. Klein. 2002. «Vulnerability and Adaptation Assessments to Climate Change: An Evolution of Conceptual Thinking». In *integrating Disaster Reduction*

and Adaptation to Climate Change (17-19 June 2002): UNDP Expert Group Meeting.

- Gachon P., N. Gauthier, A. Bokoye, D. Pauishkura, A. Cotnoir, Y. Trembley et G. Vigeant. 2007. Variabilité, extrême et changement climatique au Sahel : de l'observation à la modélisation. Rapport de projet –Entente de coopération entre le Centre AGRHYMET et Environnement Canada. Version mars 2007. p. 10-64.
- Gachon, P., A. St-Hilaire, T. Ouarda, VTV Nguyen, C. Lin, J. Milton, D. Chaumont, J. Goldstein, M. Hessami, T.D. Nguyen, F. Selva, M. Nadeau, P. Roy, D. Parishkura, N. Major, M. Choux et A. Bourque. 2005. *A first evaluation of the strength and weaknesses of statistical downscaling methods for simulating extremes over various regions of eastern Canada*. Montréal : Environment Canada, 209 p.
- Garba, H. 2001. L'étude prospective du secteur forestier en Afrique (FOSA) Niamey, Niger. Ministère des Eaux et Forêts, 37 p.
- GIEC. 2007. «Résumé à l'intention des décideurs. Impacts, adaptation et vulnérabilité. Contribution du Groupe de travail II au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat». In *Bilan 2007 des changements climatiques*, Parry, M.L., O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Cambridge University Press. Cambridge, 25 p.
- GIEC. 2001. *Bilan 2001 des changements climatiques : conséquences, adaptation et vulnérabilité. Résumé à l'intention des décideurs; Contribution du Groupe de travail II au troisième rapport d'évaluation du GIEC*. Coll. «Changement climatique». Cambridge: University Cambridge Press, 101 p.
- GIEC. 1995. Changement climatique : dimensions économiques et sociales. Contribution du Groupe III d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat». (Chapitre 9), Cambridge University Press, Cambridge, 447 p.
- GIEC. 1995. Directives techniques du GIEC pour l'évaluation des impacts de l'évolution du climat et des stratégies d'adaptation, OMM, 62p.
- Gilbert, R.O. 1987. Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring. NY, Van Nostrand Reinhold Company Inc, p. 234-289.
- Gonzalez, P. 2001. «Desertification and a shift of forest species in the West African Sahel». *Climate Research*. vol. 17 New York (USA.), p. 217-228.
- Gonzalez, P. 2002. «Programme to monitor impacts of desertification and climate change ». In *Africa Famine Early Warning System Network (FEWS NET)* Geological Survey (USGS), New York (USA.), 15 p.

- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2001. « Bilan 2001 des changements climatiques : les éléments scientifiques » (*rapport de synthèse du Giec*). Genève, Giec. 97 p.
- Gruhn, P., M. Goletti et F. Yudelman. 2000. Food, Agriculture, and the Environment Discussion. Integrated nutrient management, soil fertility, and sustainable agriculture: Current issues and future challenges. Washington, D.C. International Food Policy Research Institute: 23 p.
- Guttman, N.B. 1989. Statistical descriptors of climate. Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 70, no. 6, pp. 602-607.
- Hammond, A., Adrianse, A., Rodenburg, E., Bryant, D. et R. Woodward. 1995. Environmental indicators: a systematic approach to measuring and reporting on environmental policy performance in the context of sustainable development. Washington, D.C. World Resources Institute: 43 p.
- Hewitt, K. 1983. The idea of calamity in a technocratic age. In Hewitt, K. (Eds), *Interpretation of Calamities*, Allen and Unwin, Boston, MA, p. 3-32.
- Heyer, J. 1996. «The complexities of rural poverty in sub-Saharan Africa». *Oxford Development Studies*. vol. 24, no 3, p. 281-297.
- Hiernaux, P.H. et Justice, C.O. 1986. Suivi du développement végétal au cours de l'été 1984 dans le Sahel malien. *International Journal of Remote Sensing* 7, p. 1515-1531.
- Houghton, J., Y., T. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, Van der, P.J. Linden, D. Xiaosu et C.A. Johnson 2001. The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of IPCC. *Climat Change 2001*. Cambridge, Cambridge University press, UK, 94 p.
- Hountondji, Y.C., P. Ozer et J. Nicolas. 2004. «Mise en évidence des zones touchées par la désertification par télédétection à basse résolution au Niger». *Revue européenne de géographie*, vol. 291, p. 18. En ligne. <Cybergeog>.
- Huete, A.R., H.Q. Liu, K. Batchily et W. Van Leeuwen. 1997. A Comparison of Vegetation Indices over a Global Set of TM Images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of the Environment* 59(3), p. 440-451.
- Hulme, M. 1996. «Recent climatic change in the world's drylands». *Geophysical Research Letters*. vol. 23, p. 61-64.
- Huq, S., A. Rahman, M. Konate, Y. Sokona et H. Reid. 2003. *Mainstreaming adaptation to climate change in least developed countries (LDCs)*. London: International Institute for Environment and Development, 42 p.

- Igalens, J. et P. Roussel. 1998. *Méthodes de recherche en gestion des ressources humaines*. Paris, Economica, 207p.
- INSD. 2000. Recensement général de la population et de l'habitat, décembre 1996. Ouagadougou, 1996. p.135-298.
- INSD. 1996a. *Le Profil de Pauvreté au Burkina Faso*. Ouagadougou: Institut National de la Statistique et de la Démographie, 141 p.
- INSD. 1996b. *Analyse des résultats de l'enquête prioritaire sur les conditions de vie des ménages*. Coll. «Direction des statistiques générales avec la Coopération de la BAD», no 1. Ouagadougou: Institution National de la Statistique et de la Démographie (INSD), 241 p.
- Janicot, S., V. Moron et B. Fontaine. 1996. «Sahel droughts and ENSO dynamics ». *Geophysical Research Letters*, vol. 23, p. 515-518.
- Janin, P. et Y. Martin-Prével. 2003. «Soudure alimentaire et gestion sociétale des risques en zone sahélienne (Burkina Faso). Session». In *Quatrième Conférence Africaine sur la Population « Population et pauvreté en Afrique : réagir aux défis du XXI^e siècle »* (8-12 décembre 2003): Besoins alimentaires et stratégies de gestion, 17 p.
- Jolivet, M. et A. Paré. 1993. L'environnement: un champ de recherche en formation *Natures-Société-Sociétés*, Vol 1, numéro 1, 6-24 p.
- Jones, P. D.R. et R. Boer. 2003. Assessing current climate risks. Adaptation Policy Framework. Adaptation Policy Framework. A Guide for Policies to Facilitate Adaptation to Climate Change, UNDP, 34 p. En ligne. <<http://www.undp.org/cc/apf-outline.htm>>.
- Kaiser, H.F. 1958. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis». *Psychometrika*, vol. 23, p. 187-200.
- Karl, T.R., N. Neville et A. Ghazi. 1999. «CLIVAR/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for Climate Extreme: Workshop summary». *Climate Change*, vol. 42, p. 3-7.
- Karl, T.R., R.W. Knight, D.R. Easterling, et R.G. Quayle. 1996. Indices of climate change for the United States, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 77, p. 279-292.
- Kasperson, J.X, R.E Kasperson, B.L. Turner, W. Hsieh et A. Schiller. 2002. «Vulnerability to global environmental change». In *The human dimensions of global environmental change*, Thomas Dietz Andreas Diekmann, Carlo C. Jaeger, and Eugene A. Rosa. Cambridge: MA : MIT Press.
- Keller K. L. (1993), Conceptualizing, Measuring, and Managing Customer-Based Brand Equity, *Journal of Marketing Research*, 29, 1-22

- Kendall, M.G. 1975. Correlation methods. Londres: Charles Griffin and Company, 202 p.
- Kessler, C.A., W. Spaan, P. Van, W. F. Driel et L. Stroosnijder. 1995. Choix et modalités d'exécution des mesures de conservation de l'eau et des sols au Sahel. Wageningen., Tropical Resource Management. Paper No. 7, Wageningen, p. 258-287.
- Klein, R. J. S Eriksen, L.O Naess, A. Hammill, T.M. Tanner, C Robledo et K O'Brien. 2007. Portfolio screening to support the mainstreaming of adaptation to climate change into development assistance. 102 Technical, report Tyndall Centre Working Paper, 27 p.
- Klein, R.J.T, E.L.F. Schipper et S. Dessai. 2005. «Integrating mitigation and adaptation into climate and development policy: three research questions ». *Environmental Science and Policy*, vol. 8 no 6, p. 579-588.
- L'Hôte, Y., G. Mahé et B. Somé. 2003. «The 1990s rainfall in the Sahel: the third driest decade since the beginning of the century. Reply to discussion». *Hydrological Sciences Journal*, vol. 48, no 3, p. 493-496.
- Le Barbé, L., T. Lebel et D. Tapsoba. 2002. «Rainfall variability in West Africa during the years 1950-90». *Journal of climate*, vol. 15, p. 187-202.
- Lebel, T., J.L. Redelsperger et C. Thorncroft. 2003. African monsoon multidisciplinary analysis. International, Projet reaseach project and field campaign. *CLIVAR Exchanges*, 64p.
- Leisinger, K. et M.K. Schmitt. 1996. *Survivre au Sahel : Un défi pour l'écologie et la politique de développement*. The Hague, Netherlands, 232 p.
- Lepage, L. P. Berstovoy, M.J Fluet et A. Rochette. 2007. «Groupe de travail III : Vulnérabilité des populations et adaptation aux variabilités climatiques au Sahel : acteurs, institutions et dynamiques locales». In *Rapport des contributions canadiennes au projet ACIDI-CILSS (#A030978-002); appui aux capacités d'adaptation aux changements climatiques*, Montréal: Environnement Canada, p. 165.
- Leroux, M. 2000. *La dynamique du temps et du climat. 2eme édition*. Paris, France: Dunod, 360 p.
- Lézine, A.M. 1989. «Late quaternary vegetation and climate of Sahel Les projections quantitatives du futur changement climatique ». *Quaternary recherche*, vol. 32, p. 317-334.
- Mabbutt, J.A. 1986. «Desertification indicators». *Climatic Change*, vol. 9, p. 113-122.
- Mara, F. 1998. «Contribution à l'évaluation des ressources en eau dans les bassins versants de la Lity, de la Silamé et de Songné Dondé à l'aide d'un système d'information géographique». Mémoire présenté comme exigence partielle de la Maîtrise Géographie, Université du Québec à Montréal, 129 p.

- Martens, P., R.S. Kovats, S. Nijhof, P. De Vries, M.T.J. Livermore, D.J. Bradley, J.Cox, et A.J. McMichael. 1999. «Climate change and future populations at risk of malaria». *Global Environmental Change*, 9 (1), p. 89-107.
- Matlon, P.J. 1975. Burkina Faso farm level studies: survey, methode and data files,. Economics group, VLS and miscellaneous papers series Hyderabad Indian, ICRISAT p. 8-18.
- MED, (Ministère de l'Économie et du Développement du Burkina Faso). 2003. Cadre stratégique de lutte contre la piquvreté. Rapport Burkina Faso, 135 p.
- MED, (Ministère de l'Économie et du Développement du Burkina Faso). 2004. Gestion intégrée des ressources en eau du Burkina Faso. p. 46-149.
- Messenger C., H. Gallée, O. Brasseur, B. Cappelaere, C. Peugeot, L. Séguis, M. Vauclin, R. Ramel, G. Grasseau, L. Léger et D. Girou. 2006. Frequence of observed and RCM-simulated precipitation on the water discharge over the Sirba basin, Burkina Faso/Niger. *Climate Dynamics*, vol. 27, p. 199-214.
- Ministère de l'Agriculture et des Ressources Animales (MARA). 1992. La production agricole au Burkina Faso, généralités, analyses de la situation, Ministère de l'Agriculture et des Ressources Animales. Ouagadougou, 96 p.
- Mortimore, M. J. and Adams, W. M. 2001. Farmer adaptation, change and 'crisis' in the Sahel. *Global Environmental Change*, vol. 11, p. 49-57.
- Moss, R.H. 1996. *Impacts, adaptations and mitigation of climate change: Scientific-Technical Analysis. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Coll. « Climate Change». Cambridge: Cambridge University Press, 889 p.
- Mouat, D., J. Lancaster, T. Wade, J. Wickham, C. Fox, W. Kepner et T. Ball. 1997. «Desertification evaluated using an integrated environmental assessment model». *Environment Monitoring and Assessment*. vol. 48 p. 139-156.
- N'Djafa-Ouaga, H. et Courel M.F., 2000. Utilisation de l'imagerie aérienne et satellitale pour l'analyse de la mutation des espaces ruraux: cas de la sous-préfecture de Mandéla dans le département de Hadjer Lamis au Tchad. In «*La télédétection en Francophonie: analyse critique et perspectives* », Dubois, J.M.M., Caloz, R. et Gagnon, P. (eds.), AUPELF-UREF, 177-185.
- Neimanis, V. et A. Kerr. 1996. «Developping national environmental indicators». In *Geoindicators Assessing rapid environmental changes in earth systems*, A.R. Berger, Iams, W.J., A.A. Balkema, Rotterdam Balkema, p. 369-376.
- Niamego, J., J. Kaboré et J.K. Ouatarra. 1997. Pauvreté et vulnérabilité au Burkina Faso. Ouagadougou, Institut National de la Statistique et de la Démographie (INSD), 37 p.

- Niasse, M., A. Afouda et A. Amani. 2004. *Réduire la vulnérabilité de l'Afrique de l'Ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau dans les zones humides et la désertification. Élement de stratégie régionale de préparation et d'adaptation*. Gland et Cambridge: UICN, 89 p. En ligne. <<http://www.iucn.org/dbtwwpd>>.
- Nicholls, R.J., F.M.J. Hoozemans et M. Marchand. 1999. «Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise: regional and global analyses». *Global Environmental Change*, vol. 9, p. 69-87.
- Nicholson, E.S. 2001. «Climate and environmental change in Africa during the last two centuries ». *August, 15, Climate Research*. vol. 14, p. 123-144.
- Nicholson, E.S., B. Some et B. Kone. 2000. «An analysis of recent rainfall conditions in West Africa, including the rainy seasons of the 1997 El Niño and the 1998 La Niña years ». *Journal of climate*. vol. 13, p. 2628-2640.
- Nicholson, S.E. 1981. «Rainfall and atmospheric circulation during drought period and wetter years in Africa ». *Monthly Weather Review*. vol. 109, p. 137-154.
- Nicholson, S.E. 1980. «The nature of rainfall fluctuations in subtropical West Africa». *Mon. Wea. Rev.* vol. 108, no 4, p. 473-487.
- Norusis, M. 1992. *SPSS for windows Professionnal statistic*, Chicago, 48 p.
- O'Keefe, P., K. Westgate et B. Wisner. 1976. «Taking the Naturalness out of Disasters». *Nature*, vol. 260 no 5552, p. 566-567.
- O'Lenic, E., et R. Livezey. 1988. «Practical consideration in the use of Rotated Principal Component Analysis (RPCA)». In *diagnostic studies of upper-air height fields*, *Monthly Weather Review*, p. 1682-1689:
- OMS. 1986. *Directives de qualité l'eau de boisson*, vol. 1, *Recommandations* et vol. 2, *Critères d'hygiène et documentation à l'appui*, Genève, Suisse.121.
- OMS. 2007. *Statistiques sanitaires mondiales*. Organisation Mondiale de la Santé 86 p.
- Ouellet, M. et M.D. Gagne. 1992. *Conférence des Nations-Unies sur l'Environnement et le developpement (CNUED)*. Bissau, 173 p.
- Ozer, P., M. Erpicum, G. Demaree et Vandiepenbeeck M. 2003. «The Sahelian drought may have ended during the 1990s». *Hydrological Sciences Journal*, vol. 48, p. 489-492.
- Parry, M.L., C. Rosenzweig, A. Iglesias, M. Livermore et G. Fischer. 2004. «Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios ». *Global Environmental Change*, vol. 14 no 1, p. 53-67.

- Peterson, T.C., C. Folland, G. Gruza, W. Hogg, A. Mokssit et N. Plummer. 2001. Report of the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapports World Meteorological Organization Technical Geneva, World Meteorological Organization, 146 p.
- Peugeot, C., B. Cappelaere, B. E. Vieux, L. Seguis et A. Maia. 2003. Hydrologic process simulation of a semiarid, endoreic catchment in Sahelian West Niger. 1. Model-aided data analysis and screening. *Journal of Hydrology*, 279, p. 224-243.
- PNUD. 1992. *Évaluation de la désertification et de la sécheresse dans la région soudano-sahélienne, 1985-1991*. New York. 334 p.
- PNUD. 2008. *Rapport mondial sur le développement humain 2007/2008 La lutte contre le changement climatique : un impératif de solidarité humaine dans un monde divisé*, Éditions La Découverte. New York: Programme des Nations Unies pour le développement, 391 p.
- Poccard, I. 2000. «Étude diagnostique de nouvelles données climatiques : les réanalyses. Exemples d'application aux précipitations en Afrique tropicale». Doctorat, Dijon, Université de Bourgogne, 310 p.
- Pouchin, T., J. Debie et A. Bourcier. 2002. «L'observation de la végétation de l'Afrique de l'Ouest par télédétection spatiale : l'apport de l'indice de végétation normalisé ». *Science et changements planétaires/ Sécheresse*, vol. 13, p. 187-194.
- Preston, B.L., D. Abbs, B. Beveridge, C. Brooke, R. Gorddard, M. Hunt, P. Justus, I. Kinrade, T.G. Macadam, K. Measham, C. McInnes, J. Morrison, O'Grady, T.F. Smith et G. Withycombe. 2008). Spatial approaches for assessing vulnerability and consequences in climate change assessments. CSIRO Marine and Atmospheric Research, Aspendale. VIC, Australia: 7 p.
- Prince, S.D. 2002. «Spatial and temporal scales for detection of desertification». In *Global Desertification: Do Humans Cause Deserts?* Edited by Reynolds J.F. and D.M. Stafford Smith Dalhem University Press, p. 23-40.
- Reardon, T. 1997. «Using evidence of household income diversification to inform study of the rural non-farm labour market in Africa». *World Development*. vol. 25, no 5, p. 735-747.
- Remenieras, G. 1986. Hydrologie de l'Ingénieur. 2ème éd. Revue et augmenté, Édition Eyrolles, Paris 455 p.
- Richman, M. B. 1986. «Rotation of principal components». *International Journal of Climatology*. vol. 6, p. 293-335.

- Rigina, O. et M.S. Rasmussen. 2004. «Using trend line and principal component analysis to study vegetation changes in Senegal, 1986-1999 from AVHRR NDVI 8 km data. ». *Geografisk Tidsskrift*. vol. 103, p. 31-42.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A. & Deering, D. W. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, *Third ERTS Symposium*, NASA SP-351 I, p. 309-317.
- Ruttan, L. M. 1998. «Closing the commons: cooperation for gain or restraint?». *Human Ecology*. vol. 26, p. 43-66.
- Samson B. Et Gérard C. J., 1991. Traitement d'image et extraction automatique des éléments topographiques de la carte au 1/50 000°. In : Télédétection et gestion des ressources, Vol. VII, P. Gagnon éd., Association québécoise de télédétection, p. 189-1992.
- Sanders, J. H. et B.I. Shapiro. 2003. «Crop technology introduction in semiarid West Africa: Performance and future strategy». *Journal of Crop Production*,. vol. 9, no 2 and 3, p. 559-592.
- Saunders, R.J. et Warford, J.J. 1976. L'alimentation en eau de communautés rurales : économie et politique générale dans le monde en développement, Banque Mondiale, Washington,
- Savadogo, R.C. 2004. Rapport provisoire : adaptation au changement climatique pour le système hydrologique des fleuves sahéliens et bassins versants de leurs affluents : cas de la Sirba au Burkina Faso, Niger. Niamey AGRHYMET: 54 p.
- Sawadogo, L., R. Nyagard et F. Pallo. 2002. «Effects of livestock and prescribed fire on coppice growth after selective cutting of Sudanian savannah in Burkina Faso». *Annals of Forest Science*. vol. 59, no 2, p. 185-196.
- Seidou, O., T.B.M.S.Ouarda, P. Gachon, A. Cotnoir, A. Bokoye, M. Badolo, H. N'Djafa Ouaga, A. Amani et S.S. Hibra. 2006. Modélisation statistique de la relation climat production céréalière pour le Niger. Québec, Rapport INRS-ETE, 46p.
- Sen, P.K. 1968. «Estimating of the regression coefficients based on the Kendall's tau». *Journal of American Statistical Association*, vol. 63, p. 1379-1389.
- Seyoum, H. 1995. Analyzing and mapping food insecurity: An exploratory CART methodology applied to Ethiopia Final report to the USAID Health and Human resources analysis for Africa Project, IFPRI, Washington DC, USAID, 53 p.
- Sharma, N.P., T. Damhang, E. Gilgan-Hunt, D. Grey, V. Okaru et D. Rothberg. 1997. *Gestion durable des ressources en eau de l'Afrique. Défis et opportunités*. Coll. «Document technique de la Banque Mondiale», no 331. Washington: Département Technique Afrique, Banque Mondiale, 335 p.

- Smit, B. et O. Pilifosova. 2001. «Adaptation to climate change in the context of sustainable development and equity». In *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, McCarthy, J.J. O. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken, K.S. White, (Eds.), IPCC Working Group II, Cambridge University Press, p. 877-912.
- Sokona, Y. et F. Denton. 2001. «Climate Change Impacts: can Africa cope with the challenges? ». *Climate Policy*, vol. 1, p. 117-123.
- Somé, L., J.B., Taounda et S. Guillobez. 1992. *Le milieu physique du Burkina Faso et ses contraintes*. INERA. Neth Journal Agricultural Sciences, 35, p. 417-426.
- Stoorvogel, J. J. et E. M. A. Smaling. 1990. Assessment of soil nutrient depletion in Sub-Saharan Africa 1983-2000. Winand Staring Centre. for Integrated Land, Soil and Water Research. Report 28, Wageningen, The Netherlands, 137 p.
- Sultan, B., C. Baronb, M Dingkuhnb, B. Sarre et S. Janicot. 2004. «Agricultural impacts of large-scale variability of the West African monsoon. ». *Agricultural and Forest Meteorology, DTD*, vol. 5, p. 3318- 33336.
- Tabachnik, B.G. Fidell et S. Linda. 1996. *Using multivariate statistics*. New York: Harper and Row, 509 p.
- Taith, A. 2007. «Changement climatique et sécurité des États : un lien opérationnel à construire localement et à moyen terme». *Note de la FRS*, p. 14.
- Tapsoba, D. 1997. «Caractérisation événementielle des régimes pluviométriques ouest africains et de leur récent changement». Doctorat Université Paris-Sud (Orsay), 45-125 p.
- Taweye, A. 1995. «Contribution à l'étude hydrologique du bassin versant de la Sirba à Garbé-kourou. Mémoire présenté comme exigence partielle à l'obtention du grade d'Ingénieur en Hydrologie». Maîtrise, Niamey, Hydrologie, Centre Régional AGRHYMET, 93 p.
- Thomas, D.G. et N. Middleton 1994. «Desertification: Exploding the Myth». In *World Atlas of Desertification*, N. and D.Thomas Middleton, 1997, p. 1-69. London, United Kingdom: Arnold.
- Trzaska, S. et S. Janicot. 2003. «The role of the Indian Ocean in modulation of ENSO impacts on the West African Monsoon». *CLIVAR Exchange*. vol. 8, no 2/3, p. 19-23.
- Turner, B.L., R.E. Kasperson, P.A. Matson, J.J. Mccarthy, R.W. Corellg, L. Christensene, N. Eckleyg, J. X. Kasperson, A. Luerse, M. L Martello, C. Polsky, A. Pulsipher et A. Schiller. 2003. A framework for vulnerability analysis In *Proceedings of the National Academy of Sciences*, London, 100 (4), p 8074-8079.

- UNEP. 2002. Assessing Human Vulnerability to Environmental Change, Concepts, Issues, Methods and Case Studies. A report on work in progress. UNEP/DEWA/RS. 03-5. Nairobi En ligne. <<http://www.cybergeogeo.eu/index2761.html>>.
- UNFCCC. 2006. Background paper for the African Workshop on Adaptation Implementation of Decision, 21-23 novembre. Accra, Ghana, 1/CP.10 of the UNFCCC Convention, 54 p.
- van Liesert, M., R.S. Kovats, M.T.J. Livermore et P. Maartens. 2004. «Climate change and malaria: analysis of the SRES climate and socio-economic scenarios». *Global Environmental Change*, vol. 14 no 1, p. 87-99.
- Vierich, H. I. D. et W. A. Stoop. 1990. «Changes in West African savanna agriculture in response to growing population and continuing low rainfall». *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 31, no 2, p. 115-132.
- Vincent, K. 2004. Creating an index of social vulnerability to climate change for Africa. Working Paper. 56, Tyndall Centre for Climate Change Research 43 p.
- Vischel, T. 2006. «Impact de la variabilité pluviométrique de méso-échelle sur la réponse des systèmes hydrologiques sahéliens : modélisation, simulation et désagrégation. Thèse présentée pour l'obtention du grade Docteur de l'INPG». Grenoble, Institut National Polytechnique de Grenoble, 179 p.
- Voisins Mondiaux. 1997. Rapport d'évaluation du plan triennal du Programme de Liptougou, Burkina Faso. Ouagadougou: 15-36 p.
- Von Storch, H. et F. Zwiers. 2002. *Statistical analysis in climat research*. Cambridge University Press, 484 p.
- Wijkman, A. et L. Timberlake. 1984. «Natural Disasters: Acts of God or Acts of Man Nottingham: Earthscan Publications, 126 p.
- Wisner, B., P. Blaikie, T. Cannon, I. Davies et T. Cannon. 2004. At Risk Natural Hazards. People's Vulnerability and Disasters. Second ed. London, Routledge, p 318-350.
- Wolff, E. 1994. «Contribution à l'analyse de l'agriculture africaine à l'aide de la télédétection et d'un système d'information géographique. Le cas du Fouta Djallon- République de Guinée. Dissertation présentée en vue de l'obtention du grade de docteur en science Faculté des Sciences». Louvain-la-Neuve Belgique, Laboratoire de Télédétection et d'analyse régionale, université catholique de Louvain, 324 p.
- World Meteorological Organization. 1984. Technical Regulations, Vol. 1. WMO Publication Geneva, Switzerland, 49 p.
- Wright, I. 1982. « Écologie et développement rural en Afrique Sub-Saharienne, quelques études à l'échelle régionale et du village ». In *Proceedings of the Regional Workshop*

: *Farmers and scientists in a changing environment. Assessing Research in West Africa.* (22-26 Novembre 1982).

Zaccaï, E. 2002. *Le développement durable : dynamique et constitution d'un projet*, Bruxelles, Presses Inter-universitaires Européennes Peter Lang, Bern, 2^e édition, 358 p.

ANNEXE A : QUESTIONNAIRE

Le questionnaire a été inspiré de celui utilisé par l'équipe de recherche de Pr. Lepage.

A. Description du travail

1. Quelle est votre activité principale ?
2. Depuis quand ?
3. Quelles sont les principales activités menées par les hommes, les femmes et les enfants dans votre village?
4. Quels sont les groupes ethniques qui existent dans le village ?
5. Quelles sont les relations qui existent entre ces différents groupes?
6. Pour votre travail, quelles sont parmi vos relations, celles que vous estimez les plus importantes ? les plus difficiles ? Pourquoi

Gestion de l'eau, et activités socio-économiques

1. Quelles sont les principales ressources en eau dans votre zone?
2. Quels constats faites-vous de leur évolution depuis ces dernières décennies?
1. Quelles en sont les causes?
2. Comment la population locale gère cette ressource en eau ?
3. Quels sont les conflits existants entre les utilisateurs de l'eau? Est-ce une réalité ?
4. Existe-t-il des mécanismes de résolution de ces conflits?
5. Est-ce que vous participez à l'élaboration des modes de gestion de cette ressource et sont-elles appropriées et adoptées par vous?
6. Existont-ils des comités de gestion de ces points d'eau par exemple un forage ou borne fontaine?
7. Êtes-vous sollicité pour discuter autour de la même table lors de la prise de décisions sur la gestion des ressources en eau ou sur l'environnement ?
8. A votre avis, comment peut on trouver une solution durable à ce problème de gestion d'eau ?
9. Existe-t-il un cadre local de concertation sur les questions d'eau au niveau du village? Si oui lequel ? Si non -quelle proposition pourriez-vous faire dans ce sens ?
10. De nos jours, la pêche est-elle individuelle ou collective?
11. Quels types de transport utilisez-vous?

B. Santé et environnement

1. Avez-vous des moyens de rendre l'eau potable?
2. Quelles sont les maladies les plus fréquentes liées à son utilisation ? Citez-les? (Méningite, paludisme, tuberculose, fièvre typhoïde, maladies diarrhéiques, toux, bilharziose, vers de guinée, les parasitoses.
3. De quelles sources d'eau proviennent ces maladies ?
4. Existent-ils des infrastructures sanitaires et scolaires dans votre village ?
5. Ces dernières années avez-vous constaté la création de groupements femmes ou d'hommes ?
6. Existe-t-il des structures de micro finances ou de tontine organisées dans le village ?

C. Rapport au territoire

1. Votre environnement (territoire) s'est-il transformé au cours des dix (10) dernière s années?
2. Comment expliquez-vous ces transformations ? : sur le climat, l'eau, la végétation, le sol, les peuplements, les frontières, la faune etc..?
3. Est-ce que vous avez changé de type d'habitation ces dernières années?
4. Constatez-vous des déplacements de populations actuellement ? si oui - lesquelles (hommes, femmes, vieux ou jeunes et ethnies si possibles)?
5. Quels sont, selon vous, les principaux problèmes qui découlent de la variabilité du climat ?
6. Pouvez-vous donner des explications sur l'aspect climatique : une mauvaise répartition de la pluie ou l'augmentation de la température ?
7. Quels types de phénomènes climatiques se manifestent fréquemment dans votre localité ? Longue période sans pluie, inondations, vents violents, vents de sable ou autres ?
8. Dans votre village, ou groupe, existe-t-il une façon de prédire le climat ?
9. Quelles sont les solutions préconisées par vous pour s'adapter aux effets dus aux changements climatiques ?

ANNEXE B :

MÉTHODE DE CALCUL DES INDICES ET DÉTECTION DES TENDANCES

Les indices pluviométriques ont été calculés à partir des valeurs quotidiennes de précipitations selon la méthode ci-dessous développées par le Groupe de travail II du Projet d'appui à l'adaptation aux changements climatiques (Gachon *et al.*, 2007).

- Nombre de jour de précipitation (Prepl : % de jour) : Pij étant la hauteur totale de précipitation quotidienne du jour i de la période j. L'on dénombre le nombre de jour où :

$$P_{ij} \geq 1 \text{ mm}$$

- Intensité quotidienne simple (SDII : mm/jour de pluie) : Pwj étant la hauteur totale de précipitation quotidienne des jours de pluie, w (P=1mm) de la période j et W étant le nombre de jour de pluie de la période j. l'intensité de la précipitation est définie comme suit :

$$SDII_j = \frac{\sum_{w=1}^w P_{wj}}{W}$$

- Nombre maximal de jours consécutifs secs (CDD : jour) : Pij étant la précipitation quotidienne du jour j. Le nombre maximum des jours secs consécutifs est défini comme suit :

$$CDD = \max (P_{ij} < 1 \text{ mm})$$

- Maximum de précipitation totale pendant 3 jours consécutifs (R3days : mm) : P3j étant la hauteur de précipitation totale chaque 3 jours pendant la période j. le maximum de la précipitation pour 3jours est défini comme suit :

$$R3dj = \max (P3j)$$

- 90^e centile de la précipitation totale (Rank90) : Pwj étant la hauteur de précipitation quotidienne totale des jours de précipitation (P=1mm) de la période j. les valeurs de Pwi sont classées par ordre croissant ensuite le 90^e rang-centile est défini à travers la formule non paramétrique de Cunnane (1978). La valeur du 90^e centile correspondant au rang90p est obtenue par interpolation linéaire entre deux valeurs les plus rapprochées.

•

$$\text{Rank90p} - [(0.9 * (w + 0.2)) + 0.4]$$

- Pourcentage de jour de précipitation supérieur au 90^e centile sur la période 1961-1990 (R90N : %

jour). Soit P_{wj} la hauteur de précipitation quotidienne du jour de pluie w ($P=1\text{mm}$) de la période j et soit P_{wn90} le 90^e centile de précipitation des jours de pluie de la période de référence. L'on dénombre le nombre de jour où :

$$P_{wj} > P_{wn90}$$

Le nombre de jour est exprimé en pourcentage pour éviter la variation due aux données manquantes.

- Précipitation totale (PrcTOT : mm) : P_{ij} étant la précipitation quotidienne pour le jour i de la période j et soit I le nombre total de jour pour cette même période

$$\text{PrcTOT} = \sum_{i=1}^I P_{ij}$$

- Précipitation moyenne (MOY : mm/j) : P_{ij} étant la précipitation quotidienne pour le jour i de la période j et I le nombre total de jour pour cette même période. La moyenne MOY_j s'obtient de la manière suivante :

$$\text{MOY}_j = \frac{\sum_{i=1}^I P_{ij}}{I}$$

- Écart-type (STD : mm/jour) : P_{ij} étant la précipitation quotidienne pour le jour i de la période j et I le nombre total de jour pour cette période. \bar{P}_j est la moyenne sur le période j .

$$\text{STD}_j = \sqrt{\frac{1}{I-1} \sum_{i=1}^I (P_{ij} - \bar{P}_j)^2}$$

ANNEXE C
CUMUL MOYEN MENSUEL DE PRÉCIPITATIONS (mm) SUR LA PÉRIODE 1961-
2004 (SOURCE : MÉTÉOROLOGIE DU BURKINA FASO)

Tableau C.1 Station de Fada N’Gourma

Années	avril	mai	juin	juillet	août	sept	oct	Moy/mois	Cumul/an
1961	18	77	197	339	207	125	0	138	963
1962	0	39	185	142	358	206	61	142	991
1963	71	76	124	264	302	168	76	154	1080
1964	36	35	104	252	227	332	2	141	986
1965	29	36	116	182	131	210	32	105	735
1966	23	114	68	100	318	199	16	120	838
1967	21	74	135	112	195	227	1	109	766
1968	66	120	121	266	139	113	68	128	893
1969	47	17	113	160	263	175	63	120	837
1970	8	23	58	178	262	177	0	101	706
1971	2	69	86	176	197	157	25	102	713
1972	90	48	66	174	186	151	50	109	765
1973	2	53	94	243	239	54	0	98	685
1974	5	36	90	121	164	174	32	89	623
1975	20	65	157	131	122	56	136	98	687
1976	0	119	80	180	204	291	5	126	879
1977	1	118	67	127	387	185	33	131	919
1978	47	100	112	124	117	134	19	93	653
1979	15	98	133	222	146	155	15	112	786
1980	5	98	105	90	192	73	36	85	598
1981	5	121	58	260	152	59	22	96	675
1982	2	84	63	249	134	93	57	97	682
1983	2	55	178	96	163	142	0	91	636
1984	94	29	133	91	65	114	17	78	543
1985	0	48	174	184	187	156	11	109	760
1986	11	23	119	117	128	164	7	81	568
1987	20	2	112	140	120	134	26	79	553
1988	115	17	133	114	218	117	0	102	713
1989	0	10	121	299	219	164	42	122	855
1990	10	95	72	90	166	116	9	80	557
1991	51	295	105	99	114	67	148	126	879
1992	26	80	92	204	266	141	34	120	843
1993	51	295	105	99	114	67	148	126	879
1994	26	80	92	204	266	141	34	120	843
1995	8	34	96	255	208	106	18	104	725
1996	51	292	105	151	114	67	148	133	928
1997	48	46	65	190	411	66	26	122	851
1998	6	56	133	170	187	121	26	100	698
1999	9	105	84	110	91	133	12	78	544
2000	59	48	58	106	229	210	7	102	716
2001	46	49	120	98	150	119	47	90	629
2002	0	150	169	116	202	144	11	113	792
2003	11	32	98	128	164	126	58	88	617
2004	23	116	66	271	169	131	20	114	795

Tableau C.2 Idem que le tableau C1 mais pour la station de Zorgho

<i>Années</i>	<i>avril</i>	<i>mai</i>	<i>juin</i>	<i>juillet</i>	<i>août</i>	<i>sept</i>	<i>oct</i>	<i>Moy/mois</i>	<i>Cumul/an</i>
1961	23,0	144,4	106,9	126,8	218,4	170,3	55,1	120,7	844,9
1962	22,4	67,8	68,8	210,2	213,6	110,3	81,1	110,6	774,2
1963	13,9	43,2	140,3	169,0	288,8	272,2	14,6	134,6	942,0
1964	19,0	140,4	72,9	263,2	223,2	272,5	16,4	143,9	1007,6
1965	101,4	100,5	97,5	89,7	247,4	170,0	66,6	124,7	873,1
1966	9,5	96,3	142,7	262,6	237,0	136,0	2,8	126,7	886,9
1967	31,3	118,9	116,4	189,0	153,8	122,2	55,0	112,4	786,6
1968	4,6	11,8	155,6	143,9	275,4	148,5	75,8	116,5	815,6
1969	8,1	108,2	99,2	187,1	278,7	128,8	23,4	119,1	833,5
1970	0,0	30,7	16,0	111,4	168,8	188,6	185,2	100,1	700,7
1971	0,0	66,0	48,0	120,9	49,9	168,0	117,8	81,5	570,6
1972	0,0	0,0	57,1	97,4	184,9	204,2	148,4	98,9	692,0
1973	0,0	2,6	58,2	63,2	157,7	237,7	119,3	91,2	638,7
1974	1,5	18,9	110,9	63,3	144,2	188,8	147,4	96,4	675,0
1975	4,2	1,0	91,5	104,5	211,5	214,1	138,6	109,3	765,4
1976	11,0	16,9	59,5	80,9	122,7	135,6	151,8	82,6	578,4
1977	3,9	14,5	91,5	190,1	279,5	54,3	63,2	99,6	697,0
1978	1,8	41,1	121,7	128,5	155,6	103,2	48,9	85,8	600,8
1979	63,5	46,5	56,3	126,6	134,1	104,7	27,1	79,8	558,8
1980	6,9	71,9	104,7	150,4	164,7	143,7	0,0	91,8	642,3
1981	10,4	72,6	59,1	130,5	161,3	113,7	8,8	79,5	556,4
1982	0,0	8,3	63,7	140,3	175,2	105,3	10,2	71,9	503,0
1983	0,0	23,4	86,0	207,1	148,6	127,2	26,4	88,4	618,7
1984	3,5	0,0	19,8	76,6	154,5	145,2	49,0	64,1	448,6
1985	0,0	0,0	2,1	50,9	52,8	129,4	128,0	51,9	363,2
1986	0,0	6,3	83,3	124,8	246,7	138,2	0,0	85,6	599,3
1987	17,7	71,2	99,7	45,3	201,9	79,7	0,0	73,6	515,5
1988	24,2	93,3	85,3	152,7	221,1	30,1	64,9	95,9	671,6
1989	27,8	182,1	62,5	216,7	150,6	110,1	27,4	111,0	777,2
1990	2,9	0,0	170,8	130,6	212,9	164,3	45,8	103,9	727,3
1991	9,5	33,5	69,0	273,7	363,8	277,8	109,0	162,3	1136,3
1992	38,7	21,9	79,6	146,3	285,1	103,6	89,8	109,3	765,0
1993	10,1	101,6	84,4	118,4	192,3	98,6	17,3	89,0	622,7
1994	4,9	24,3	121,5	128,4	78,1	121,6	66,3	77,9	545,1
1995	31,6	70,9	113,3	135,5	159,2	141,2	8,4	94,3	660,1
1996	6,6	96,5	109,6	177,5	166,9	217,4	1,9	110,9	776,4
1997	3,1	49,2	133,4	93,2	109,5	89,1	33,6	73,0	511,1
1998	2,1	54,0	67,8	138,1	226,9	98,6	12,6	85,7	600,1
1999	24,6	16,5	96,8	170,2	169,6	162,5	111,2	107,3	751,4
2000	3,1	63,3	133,4	122,6	109,5	97,9	33,6	80,5	563,4
2001	2,1	26,8	69,4	138,1	237,1	116,2	12,6	86,0	602,3
2002	24,6	18,2	96,8	139,6	169,6	162,5	111,2	103,2	722,5
2003	11,5	127,5	78,0	238,3	152,2	111,2	2,2	103,0	720,9
2004	22,6	115,6	66,4	270,5	168,8	130,5	20,4	113,5	794,8

Tableau C.3 Idem que le tableau C1 mais pour la station de Koupela

<i>Années</i>	<i>avril</i>	<i>mai</i>	<i>juin</i>	<i>juillet</i>	<i>août</i>	<i>sept</i>	<i>oct</i>	<i>Moy/mois</i>	<i>Cumul/an</i>	<i>Années</i>
1961	0	49,1	195	165	348	247,7	0	143,5	1004,6	132,8
1962	17,7	152,9	159	113	241,9	124,2	81,5	127,1	889,5	132,8
1963	17,7	152,9	158,6	112,7	241,9	124,2	81,5	127,1	889,5	132,8
1964	8,5	21,4	122,7	209,7	229,1	180,9	3,7	110,9	776,0	132,8
1965	24,2	33,2	111	241	225,3	247,9	3,2	126,6	886,4	132,8
1966	73,7	243,8	96,1	67,4	213,3	112,2	66,8	124,8	873,3	132,8
1967	5,5	54,7	91,2	182	252,6	165,8	4	108,0	755,9	132,8
1968	72,9	139,6	92	145	164,6	110,6	35,8	108,6	760,2	132,8
1969	7,8	50,8	97,3	152	200,1	152,4	27,7	98,3	688,0	132,8
1970	1,2	15,6	87	117	158,1	203,2	0	83,1	581,9	132,8
1971	2,4	60,1	80,7	197	219	222,6	17,7	114,3	799,9	132,8
1972	51,8	9,3	68	129	125,8	119,6	34,2	76,8	537,3	132,8
1973	1,9	60,5	122	80,5	242,3	108,3	48,8	94,8	663,9	132,8
1974	59,3	16,9	93	208	229,1	207,1	31	120,6	844,0	132,8
1975	11,9	67,2	68,5	218	249,5	131,3	0	106,6	746,5	132,8
1976	7,4	108,9	162	107	193,3	208,7	113	128,6	900,4	132,8
1977	0	32,5	130	184	257,9	92	5,2	100,1	700,6	132,8
1978	60,1	92,3	57	95,3	181,6	97,5	38,5	88,9	622,3	132,8
1979	37,1	109,3	62,8	132	180,3	124,3	60,3	100,8	705,9	132,8
1980	0	77,5	42,3	155	227,8	48,3	89,2	91,4	639,9	132,8
1981	16,9	86,7	105	184	146,2	107,2	24,1	95,7	670,0	132,8
1982	15,4	56,9	81,6	135	154,5	88,4	6,8	76,9	538,4	132,8
1983	36,6	55,8	203	73	146,4	117,8	0	90,4	632,9	132,8
1984	23,9	12,9	60,5	46,5	125,9	159,3	28,7	65,4	457,7	132,8
1985	0	18,2	114	129	183	78,8	6	75,6	529,3	132,8
1986	18,9	42	125	223	181,5	123,8	35,7	107,1	749,8	132,8
1987	0	27,8	112	192	252,3	74	62,6	103,0	720,9	132,8
1988	31	45,9	84,5	138	349,9	88,5	27,6	109,4	765,7	132,8
1989	0	10,5	90	283	283,1	99,5	39	115,0	805,1	132,8
1990	27	82,8	127	169	137,5	104	9,2	93,7	655,8	132,8
1991	48,7	159,9	103	150	159,4	69,8	71,3	108,9	762,3	132,8
1992	46,4	81,8	87,1	130	329,3	55,7	0	104,3	730,3	132,8
1993	0	3,4	175	235	235,5	154,4	64,2	123,9	867,6	132,8
1994	13,8	17,2	138	141	396,5	254	152	159,0	1112,7	132,8
1995	8,5	51,3	82,9	89,7	288,3	95,9	36,9	93,4	653,5	132,8
1996	28,6	53,3	64,2	162	236,9	119,2	41,1	100,8	705,7	132,8
1997	0	11,4	48,8	120	65,5	76,8	40	51,8	362,6	132,8
1998	61,3	40,1	95,7	158	194,8	209,8	47,1	115,2	806,4	132,8
1999	9,3	86,9	181	105	231,2	200,2	2,7	116,6	815,9	132,8
2000	17,3	54,9	180	147	157,1	56,3	29,9	91,8	642,9	132,8
2001	0	24,1	109	209	113,5	21,2	30	72,4	506,9	132,8
2002	14,2	22,9	154	111	140,9	196,8	74,8	102,1	714,6	132,8
2003	14,8	91,1	129	278	122	173	26,8	119,2	834,3	132,8
2004	111,2	97,1	103	265	162,2	127,9	13,6	125,7	880,2	132,8

Tableau C.4Idem que le tableau C1 mais pour la station de Boulsa

<i>Années</i>	<i>avril</i>	<i>mai</i>	<i>juin</i>	<i>juillet</i>	<i>août</i>	<i>sept</i>	<i>oct</i>	<i>Moy/mois</i>	<i>Cumul/an</i>
1961			1,3	105,7	37,4	145,0	140,7	0,0	0,0
1962	38,4	63,2	155,4	138,0	305,0	222,4	24,2	135,2	946,6
1963	35,8	38,1	93,8	164,9	114,7	72,9	71,0	84,5	591,2
1964	36,6	10,6	113,1	275,7	284,2	353,8	0,0	153,4	1074,0
1965	0,0	62,4	111,7	189,9	223,4	269,4	29,5	126,6	886,3
1966	27,1	81,9	140,3	89,4	137,5	140,5	46,3	94,7	663,0
1967	18,5	54,4	134,2	115,0	211,0	161,4	4,4	99,8	698,9
1968	26,1	83,5	135,0	206,5	102,6	195,2	68,8	116,8	817,7
1969	1,6	16,0	95,9	122,8	142,6	172,5	60,8	87,5	612,2
1970	4,5	9,1	88,3	106,3	191,5	102,1	0,0	71,7	501,8
1971	3,3	24,2	47,9	152,6	121,2	80,0	0,0	61,3	429,2
1972	16,2	16,8	109,0	107,2	213,0	78,7	43,0	83,4	583,9
1973	61,0	55,2	34,7	250,5	137,3	107,3	0,0	92,3	646,0
1974	0,0	34,1	116,9	179,2	240,2	115,0	23,2	101,2	708,6
1975	0,0	44,2	131,0	113,6	155,9	81,3	14,2	77,2	540,2
1976	0,0	87,5	104,2	245,8	252,1	123,1	79,6	127,5	892,3
1977	0,0	38,3	40,7	230,9	148,3	123,1	9,1	84,3	590,4
1978	69,1	14,2	77,8	161,1	159,4	68,3	29,1	82,7	579,0
1979	83,2	23,3	105,9	77,3	218,8	168,2	12,8	98,5	689,5
1980	0,0	14,6	95,4	237,3	131,1	48,4	15,9	77,5	542,7
1981	0,0	93,5	161,8	194,2	131,5	134,4	11,4	103,8	726,8
1982	10,1	94,8	92,4	80,6	121,8	67,2	24,3	70,2	491,2
1983	3,0	22,1	136,1	117,5	146,2	126,8	25,4	82,4	577,1
1984	17,2	69,8	90,3	57,8	142,9	113,9	44,0	76,6	535,9
1985	0,0	10,6	39,5	170,5	169,1	68,5	3,5	66,0	461,7
1986	0,0	64,0	103,5	154,0	143,5	130,1	0,0	85,0	595,1
1987	0,0	3,0	169,0	144,5	181,5	167,5	20,5	98,0	686,0
1988	113,5	1,5	138,0	117,5	220,5	102,1	11,5	100,7	704,6
1989	0,0	12,0	66,2	110,8	317,2	117,0	11,0	90,6	634,2
1990	16,9	54,9	83,7	108,9	183,4	89,0	13,8	78,7	550,6
1991	51,5	152,9	74,7	72,8	255,6	37,7	51,0	99,5	696,2
1992	16,5	55,6	115,0	102,0	230,7	107,9	11,3	91,3	639,0
1993	0,0	12,8	112,9	95,5	223,0	86,9	43,3	82,1	574,4
1994	0,0	14,4	94,1	182,6	354,1	186,1	105,0	133,8	936,3
1995	12,0	39,5	123,4	92,2	183,2	93,5	48,0	84,5	591,8
1996	7,5	66,8	88,0	90,5	201,0	132,0	46,0	90,3	631,8
1997	14,7	12,0	47,0	107,1	69,9	98,5	65,9	59,3	415,1
1998	23,0	50,0	102,7	130,9	98,9	113,1	45,5	80,6	564,1
1999	30,0	36,4	70,0	139,0	166,3	160,6	9,9	87,5	612,2
2000	20,4	41,6	125,8	49,5	15,7	31,1	0,0	40,6	284,1
2001	81,7	95,1	108,2	72,3	0,0	0,0	0,0	51,0	357,3
2002	8,4	0,0	109,0	43,0	168,5	167,6	95,5	84,6	592,0
2003	3,1	32,5	116,6	215,9	149,1	133,3	11,0	94,5	661,5
2004	12,5	69,3	43,4	113,8	97,1	106,5	6,0	64,1	448,6

Tableau C.5 Idem que le tableau C1 mais pour la station de Bogandé

Années	avril	mai	juin	juillet	août	sep	oct	Moy/mois	Cumul/an
1961	3,2	36,0	90,7	164,2	280,6	104,0	9,8	98	689
1962	0,0	40,0	74,0	238,9	218,9	152,0	23,0	107	747
1963	25,5	62,9	114,5	173,9	80,7	28,6	37,2	75	523
1964	87,2	12,9	67,0	202,2	188,1	162,4	2,2	103	722
1965	25,4	131,6	85,1	167,8	244,0	140,8	0,0	114	795
1966	47,4	27,5	114,4	81,2	137,4	89,0	32,2	76	529
1967	9,6	50,5	59,0	200,3	162,6	132,8	0,0	88	615
1968	118,6	14,4	118,4	145,8	147,9	118,9	73,7	105	738
1969	0,0	17,7	49,8	145,8	148,5	116,7	17,4	71	496
1970	5,9	13,4	59,4	89,1	181,1	51,0	0,0	57	400
1971	0,0	15,3	89,4	140,9	98,7	60,7	5,1	59	410
1972	22,5	0,0	111,8	59,4	186,8	130,4	38,2	78	549
1973	30,0	0,0	72,3	161,9	97,5	126,0	4,0	70	492
1974	0,0	58,5	33,5	168,6	219,7	81,1	13,9	82	575
1975	0,0	13,2	80,8	294,6	118,1	77,1	2,0	84	586
1976	5,4	86,3	56,0	108,9	185,5	89,2	124,1	94	655
1977	0,0	1,4	60,9	171,1	189,6	82,9	17,5	75	523
1978	49,0	63,5	69,4	129,7	166,6	71,5	10,9	80	561
1979	5,7	26,5	101,1	138,3	158,2	114,7	32,3	82	577
1980	0,0	42,7	91,8	62,0	121,4	27,2	0,0	49	345
1981	0,0	76,3	88,8	89,5	108,3	102,3	3,6	67	469
1982	0,0	86,7	86,4	83,0	167,4	102,0	35,2	80	561
1983	0,0	3,5	81,7	70,1	83,4	124,2	1,5	52	364
1984	0,0	125,2	91,7	77,7	89,6	128,4	4,3	74	517
1985	9,7	7,6	14,1	137,3	144,9	136,8	0,0	64	450
1986	0,0	31,4	129,2	134,2	160,2	152,9	2,3	87	610
1987	0,0	12,0	149,8	177,6	150,9	119,3	5,2	88	615
1988	33,8	13,0	132,1	118,4	242,0	43,5	0,0	83	583
1989	0,0	6,0	35,6	119,2	206,8	99,6	0,0	67	467
1990	13,3	47,8	99,8	122,1	154,1	81,5	15,3	76	534
1991	7,3	110,8	79,3	93,3	218,7	34,0	42,6	84	586
1992	5,5	53,3	89,4	157,0	198,3	64,9	23,1	85	592
1993	0,0	23,0	76,8	111,7	141,5	66,8	55,7	68	476
1994	0,0	22,1	76,9	191,9	293,5	155,1	63,2	115	803
1995	7,6	70,8	194,2	118,2	269,9	40,5	38,2	106	739
1996	15,0	9,4	81,5	232,4	183,5	116,3	48,1	98	686
1997	19,0	11,1	47,6	91,2	199,5	143,3	23,6	76	535
1998	16,7	89,7	116,7	298,8	113,2	167,2	20,5	118	823
1999	0,0	13,8	52,3	138,8	210,8	191,0	7,6	88	614
2000	8,4	12,2	40,2	167,0	112,0	22,0	16,6	54	378
2001	0,0	50,8	192,2	132,1	102,2	76,1	36,4	84	590
2002	0,0	36,4	63,2	42,4	204,0	93,1	38,0	68	477
2003	0,0	8,3	203,5	218,4	129,0	124,9	11,1	99	695
2004	7,6	44,8	40,9	217,9	132,6	102,2	0,0	78	546

Tableau C.6Idem que le tableau C1 mais pour la station de Bilanga

<i>Années</i>	<i>avril</i>	<i>mai</i>	<i>juin</i>	<i>juillet</i>	<i>août</i>	<i>sep</i>	<i>oct</i>	<i>Moy/mois</i>	<i>Cumul/an</i>
1968	61,9	85,1	123,3	181,7	147,9	123,4	58,7	111,7	782,0
1969	13,1	28,3	100,5	163,7	193,3	148,8	41,0	98,4	688,7
1970	6,5	31,7	57,2	186,3	218,9	74,4	0,0	82,1	575,0
1971	5,0	60,3	20,1	127,3	134,9	64,4	18,7	61,5	430,7
1972	30,7	3,0	95,5	78,9	198,3	82,9	89,5	82,7	578,8
1973	7,5	53,3	71,8	233,9	212,4	53,8	2,7	90,8	635,4
1974	0,0	27,3	98,6	254,4	228,5	110,3	21,6	105,8	740,7
1975	31,6	67,1	43,9	246,0	150,7	52,5	0,0	84,5	591,8
1976	22,8	25,6	83,9	133,1	199,3	165,8	97,4	104,0	727,9
1977	0,0	46,9	76,3	215,1	230,5	206,5	21,0	113,8	796,3
1978	0,0	42,6	85,2	119,3	126,4	253,3	0,0	89,5	626,8
1979	0,0	72,5	82,5	183,2	140,9	169,4	70,1	102,7	718,6
1980	0,0	38,5	41,6	144,2	201,0	66,5	54,6	78,1	546,4
1981	0,0	33,3	126,0	152,1	67,2	126,6	18,7	74,8	523,9
1982	0,0	48,6	55,3	92,6	77,4	88,5	40,6	57,6	403,0
1983	10,0	35,6	75,8	134,8	158,1	107,6	0,0	74,6	521,9
1984	0,0	66,9	64,0	82,5	116,3	125,1	68,4	74,7	523,2
1985	0,0	70,0	24,9	90,5	173,0	84,1	3,8	63,8	446,3
1986	0,0	70,0	24,9	90,5	173,0	84,1	3,8	63,8	446,3
1987	0,0	2,2	118,8	125,0	197,9	140,5	32,8	88,2	617,2
1988	42,1	15,8	97,8	229,6	261,5	40,4	52,0	105,6	739,2
1989	0,0	6,3	83,4	142,1	336,7	94,7	6,0	95,6	669,2
1990	20,5	94,0	107,0	123,5	149,0	164,5	23,5	97,4	682,0
1991	46,5	269,1	66,8	62,5	193,7	25,0	45,3	101,3	708,9
1992	18,0	98,7	63,5	141,5	269,5	62,7	30,7	97,8	684,6
1993	0,0	0,0	148,3	119,5	188,0	102,7	70,8	89,9	629,3
1994	0,0	70,3	90,0	179,5	288,8	161,0	93,6	126,2	883,2
1995	11,6	82,9	51,6	110,7	326,7	125,7	20,0	104,2	729,2
1996	4,5	35,5	100,8	167,8	216,3	146,9	20,2	98,9	692,0
1997	2,4	52,6	83,1	141,7	70,7	116,2	20,5	69,6	487,2
1998	53,2	4,1	119,2	226,6	143,4	123,4	8,5	96,9	678,4
1999	32,1	88,6	148,3	239,4	276,4	21,3	0,0	115,2	806,1
2000	0,0	38,1	122,4	219,8	141,8	111,8	11,2	92,2	645,1
2001	14,5	37,0	77,5	189,5	73,7	97,2		81,6	489,4
2002	0,0	139,7	72,5	185,2	140,6	49,4		97,9	587,4
2003	14,6	75,6	166,8	148,2	220,3	154,9	43,5	117,7	823,9
2004	120,9	55,8	88,7	213,8	161,6	161,9	35,7	119,8	838,4

Tableau C.7 Idem que le tableau C1 mais pour la station de Gayeri

<i>Années</i>	<i>avril</i>	<i>mai</i>	<i>juin</i>	<i>juillet</i>	<i>août</i>	<i>sep</i>	<i>oct</i>
1968	29,4	26,1	79,7	106,8	151,6	147,6	87,4
1969	4,4	21,3	36,7	117,3	196,7	203,0	127,1
1970	0,0	6,2	41,1	73,1	187,3	276,6	129,7
1971	1,3	71,2	72,1	148,9	203,4	78,0	29,4
1972	0,0	66,2	38,6	132,1	83,7	233,0	71,9
1973	17,0	40,3	118,5	141,5	213,1	132,8	20,4
1974	15,0	38,7	68,9	149,6	275,9	112,6	5,1
1975	50,4	30,7	57,4	177,0	284,1	121,0	0,0
1976	16,2	82,4	41,6	103,3	264,9	108,0	127,3
1977	0,0	19,6	90,0	169,3	180,7	52,3	34,8
1978	23,4	112,8	108,4	132,3	192,1	119,7	28,5
1979	0,0	64,4	93,6	128,6	172,2	55,8	37,3
1980	0,0	62,3	108,3	115,1	142,2	94,5	27,1
1981	0,0	32,7	69,2	64,5	168,3	123,7	5,4
1982	16,2	15,0	56,5	63,9	137,1	74,5	34,8
1983	0,0	25,8	56,6	67,6	157,9	87,8	0,0
1984	0,0	28,0	109,3	142,7	121,0	79,5	45,4
1985	0,0	6,9	61,0	157,7	112,9	130,1	0,0
1986	0,0	14,0	96,5	174,3	222,3	81,1	0,0
1987	18,6	6,3	42,9	75,0	136,8	61,3	25,6
1988	33,3	1,5	155,2	149,5	252,6	150,0	0,0
1989	0,0	6,5	47,0	168,2	414,2	99,9	0,0
1990	5,0	21,4	72,2	93,6	146,3	114,5	16,2
1991	3,6	251,8	102,9	143,9	221,6	27,6	61,6
1992	7,0	53,0	87,3	230,1	181,0	36,7	13,5
1993	0,0	16,3	60,0	156,0	296,2	118,2	0,0
1994	52,8	179,5	295,1	150,1	59,4	78,0	0,0
1995	8,5	28,3	63,0	203,8	211,3	71,3	20,7
1996	155,9	118,7	197,3	107,7	31,2	0,0	0,0
1997	2,1	47,2	17,7	103,5	0,0	0,0	0,0
1998	137,8	193,5	128,6	25,5	0,0	0,0	0,0
1999	6,6	85,1	109,8	110,8	231,3	200,5	25,4
2000	22,8	27,7	120,8	255,1	120,0	102,9	18,1
2001	19,0	54,6	88,0	131,5	174,8	103,0	32,0
2002	2,7	46,9	80,4	167,6	210,4	181,8	72,6
2003	12,8	69,5	99,4	158,0	281,1	150,0	12,7
2004	66,2	40,8	78,3	221,0	183,9	104,6	13,4

Tableau C.8 Idem que le tableau C1 mais pour la station de Piela

<i>Années</i>	<i>avril</i>	<i>mai</i>	<i>juin</i>	<i>juillet</i>	<i>août</i>	<i>sep</i>	<i>oct</i>	<i>Moy/mois</i>	<i>Cumul/an</i>
1961	12,3	46,2	104,1	142,8	201,4	181,5	0,0	98,3	688,3
1962	5,1	108,9	167,3	228,8	261,3	144,1	42,3	136,8	957,8
1963	32,4	95,7	125,9	148,9	249,5	18,8	71,1	106,0	742,3
1964	124,8	18,5	129,4	172,9	220,5	230,6	23,5	131,5	920,2
1965	18,1	57,0	73,3	164,1	300,9	317,3	0,0	133,0	270,8
1966	23,7	61,2	186,3	36,3	236,7	218,2	33,3	113,7	213,0
1967	21,6	41,9	78,4	174,6	176,4	201,8	4,2	99,8	158,8
1968	30,8	47,8	116,2	199,8	201,9	111,1	25,2	104,7	181,7
1969	0,0	13,2	66,3	93,7	138,3	131,3	70,1	73,3	124,5
1970	42,0	4,3	175,8	152,8	219,1	71,7	0,0	95,1	197,2
1971	3,1	10,9	62,1	150,4	158,7	71,1	4,3	65,8	142,8
1972	16,0	26,0	180,0	53,5	158,1	86,0	49,0	81,2	142,3
1973	23,0	36,5	83,7	240,0	191,5	81,2	12,0	95,4	172,4
1974	0,0	57,5	30,8	161,6	216,0	109,8	18,5	84,9	194,4
1975	37,0	20,6	31,1	187,9	178,3	115,1	18,7	84,1	160,5
1976	49,4	124,5	119,2	129,1	327,1	125,4	116,3	141,6	294,4
1977	0,0	43,0	81,0	154,6	176,0	132,4	0,0	83,9	158,4
1978	67,5	60,7	125,3	115,5	105,7	86,9	22,2	83,4	95,1
1979	7,2	21,1	59,5	140,4	146,0	14,0	5,0	56,2	131,4
1980	2,0	54,0	100,5	79,0	180,0	79,0	20,5	73,6	162,0
1981	3,0	119,5	99,0	91,3	108,9	114,8	16,5	79,0	98,0
1982	13,6	40,3	64,5	68,0	253,3	67,7	63,5	81,6	228,0
1983	22,0	76,1	121,7	150,5	111,2	113,2	2,7	85,3	100,1
1984	0,0	21,0	62,4	51,7	164,0	146,2	35,4	68,7	147,6
1985	0,0	30,0	98,8	125,4	175,4	87,5	0,0	73,9	157,9
1986	0,0	88,5	56,9	184,6	157,0	79,5	0,0	80,9	141,3
1987	0,0	0,0	107,1	74,5	156,4	125,2	19,4	68,9	140,8
1988	33,3	5,3	74,1	115,2	350,5	95,6	7,6	97,4	315,5
1989	0,0	8,4	33,7	90,0	212,9	102,2	36,4	69,1	191,6
1990	56,7	60,8	58,2	109,2	62,9	89,0	24,1	65,8	56,6
1991	42,7	89,4	54,5	247,2	221,9	14,1	58,6	104,1	199,7
1992	15,0	64,2	101,1	95,2	159,5	88,6	8,7	76,0	143,6
1993	0,0	13,0	72,1	119,7	229,5	157,7	42,0	90,6	206,6
1994	0,0	5,2	61,1	175,1	256,7	167,3	56,7	103,2	231,0
1995	3,5	67,4	103,7	118,0	264,2	113,8	14,3	97,8	237,8
1996	3,0	80,7	65,7	75,9	159,4	150,4	34,4	81,4	143,5
1997	5,4	13,9	66,1	93,0	68,2	83,7	34,9	52,2	61,4
1998	23,7	4,4	109,4	266,3	170,7	198,7	2,7	110,8	153,6
1999	0,0	31,6	138,3	207,6	227,3	178,8	15,5	114,2	204,6
2000	26,0	14,8	100,3	219,9	71,8	54,4	55,1	77,5	64,6
2001	2,8	83,5	41,7	250,0	137,6	112,3	13,8	91,7	123,8
2002	5,0	8,8	111,4	124,0	246,5	173,4	36,9	100,9	221,9
2003	8,3	22,8	108,6	189,6	140,5	71,8	43,7	83,6	126,5
2004	43,9	40,9	48,0	146,1	185,0	132,1	0,0	85,1	166,5

Tableau C. 9 Idem que le tableau C1 mais pour la station de Tougouri

<i>Années</i>	<i>avril</i>	<i>mai</i>	<i>juin</i>	<i>juillet</i>	<i>août</i>	<i>sep</i>	<i>oct</i>	<i>Moy/mois</i>	<i>Cumul/an</i>
1961,0	0,0	45,8	150,9	108,6	258,6	49,1	0,0	102,2	613,0
1962,0	28,0	95,8	140,1	200,5	141,5	5,1	12,2	101,8	623,2
1963,0	33,8	15,2	151,0	131,9	211,2	43,0	35,1	97,7	621,2
1964,0	3,9	8,0	118,3	238,1	243,3	112,0	3,7	120,6	727,3
1965,0	1,2	55,4	90,6	165,7	303,0	284,5		150,1	900,4
1966,0	26,0	12,0	11,0	9,0	7,0	13,0	28,0	13,0	106,0
1967,0	1,9	49,0	83,8	175,9	319,4	118,2	0,0	124,7	748,2
1968,0	76,5	51,2	58,3	199,3	62,6	85,5	53,1	88,9	586,5
1969,0	46,4	23,6	117,7	74,1	224,8	99,4	34,1	97,7	620,1
1970,0	0,0	0,0	34,9	173,6	182,9	72,7	1,2	77,3	465,3
1971,0	7,8	4,3	117,8	119,0	175,6	140,2	0,0	94,1	564,7
1972,0	0,0	0,0	27,6	163,7	212,2	74,7	33,6	79,7	511,8
1973,0	46,7	31,8	63,7	187,0	89,2	109,9	9,7	88,0	538,0
1974,0	0,0	27,3	98,7	270,3	210,4	132,9	12,4	123,3	752,0
1975,0	0,0	6,0	83,3	237,0	136,3	49,9	13,3	85,4	525,8
1976,0	108,9	109,0	146,7	172,7	129,9	0,0	0,0	111,2	667,2
1977,0	93,1	169,7	223,6	72,7	14,3	0,0	0,0	95,6	573,4
1978	82,8	187,9	165,9	101,0	0,0	0,0	0,0	76,8	537,6
1981,0	87,3	58,5	102,4	34,6	20,7	0,0	2,5	43,7	306,0
1982,0	85,4	100,0	134,5	18,7	44,4	0,0	0,0	54,7	383,0
1983,0	62,4	99,6	121,7	89,7	0,0	0,0	0,0	53,3	373,4
1984,0	72,5	99,3	246,1	82,5	0,0	0,0	0,0	71,5	500,4
1985,0	35,9	95,6	137,5	68,8	0,0	0,0	0,0	48,3	337,8
1986,0	52,3	97,1	98,5	62,6	0,0	0,0	0,0	44,4	310,5
1987,0	103,5	134,0	273,0	89,3	4,2	0,0	0,0	86,3	604,0
1988,0	13,6	135,5	271,7	73,2	43,1	0,0	0,0	76,7	537,1
1989,0	24,8	194,2	158,7	41,9	16,3	0,0	0,0	62,3	435,9
1990,0	65,1	75,5	259,0	24,7	23,3	0,0	0,0	63,9	447,6
1991,0	65,1	75,5	259,0	24,7	23,3	0,0	0,0	63,9	447,6
1992,0	87,0	77,1	181,1	58,2	14,8	0,0	0,0	59,7	418,2
1993,0	65,3	124,1	210,5	58,2	6,2	0,0	0,0	66,3	464,3
1994,0	141,2	151,1	250,1	199,9	106,0	0,0	0,0	121,2	848,3
1995,0	196,8	102,5	208,4	82,1	21,8	0,0	0,0	87,4	611,6
1996,0	55,8	174,7	131,3	122,9	4,8	0,0	0,0	69,9	489,5
1997,0	26,1	81,9	126,3	151,7	17,8	0,0	0,0	57,7	403,8
1998,0	119,6	180,3	144,7	132,8	58,5	0,0	0,0	90,8	635,9
1999,0	19,1	163,4	169,7	169,4	0,0	0,0	0,0	74,5	521,6
2000,0	4,7	4,0	77,7	152,4	68,2	136,5	21,7	66,5	465,2
2001,0	13,0	18,7	63,7	137,5	211,5	40,0	0,0	69,2	484,4
2002,0	0,0	65,5	97,4	114,5	179,0	102,0	40,0	85,5	598,4
2003,0	21,0	35,0	224,0	247,2	123,5	206,0	52,6	129,9	909,3
2004,0	0,0	29,0	13,0	172,0	103,0	75,5	0,0	56,1	392,5

Tableau C.10 Idem que le tableau C1 mais pour la station de Say

<i>Années</i>	<i>avril</i>	<i>mai</i>	<i>juin</i>	<i>juillet</i>	<i>août</i>	<i>sep</i>	<i>oct</i>	<i>Moy/mois</i>	<i>Cumul/an</i>
1961	0,0	21,8	92,3	256,6	187,6	164,4	0,0	103,2	722,7
1962	0,0	17,5	27,0	259,7	246,7	119,3	19,0	98,5	689,2
1963	4,5	55,8	73,1	141,3	174,2	83,0	72,0	86,3	603,9
1964	9,6	27,2	99,5	222,6	174,4	114,0	27,7	96,4	675,0
1965	2,3	20,0	125,9	127,2	231,1	260,2	4,8	110,2	771,5
1966	24,8	90,1	159,8	73,5	108,9	133,4	8,3	85,5	598,8
1967	21,5	1,5	113,4	109,3	190,8	144,0	0,0	82,9	580,5
1968	0,0	70,2	270,0	149,4	128,5	56,2	18,0	98,9	692,3
1969	11,0	16,5	144,7	82,5	193,7	134,2	12,2	85,0	594,8
1970	0,0	15,1	33,3	121,8	148,7	83,6	0,0	57,5	402,5
1971	0,0	0,0	40,8	118,0	167,8	51,1	3,2	54,4	380,9
1972	0,0	24,9	77,9	71,2	99,3	36,5	53,9	52,0	363,7
1973	0,0	1,6	62,2	110,1	157,6	74,5	10,1	59,4	416,1
1974	2,0	30,0	37,3	296,9	198,1	60,5	17,1	91,7	641,9
1975	0,0	6,0	55,5	213,7	259,0	89,0	0,0	89,0	623,2
1976	0,0	61,0	141,0	99,0	233,0	91,0	47,0	96,0	672,0
1977	5,0	56,0	85,5	329,5	186,5	49,1	0,0	101,7	711,6
1978	98,3	50,6	173,8	105,5	88,3	114,9	17,2	92,7	648,6
1979	5,0	68,6	86,5	143,2	213,1	48,3	11,9	82,4	576,6
1980	0,0	20,5	172,8	86,8	176,1	75,5	0,0	76,0	531,7
1981	1,3	12,2	84,0	230,7	63,0	39,1	0,0	61,5	430,3
1982	0,0	0,0	95,4	77,0	104,4	50,3	30,5	51,1	357,6
1983	0,0	59,4	141,7	169,2	45,9	161,0	3,8	83,0	581,0
1984	13,9	29,1	40,0	58,4	86,3	36,8	0,0	37,8	264,5
1985	0,0	6,0	46,1	79,2	180,2	82,3	0,0	56,3	393,8
1986	8,5	46,9	43,4	164,6	165,6	187,1	10,1	89,5	626,2
1987	0,0	0,0	35,9	211,4	226,4	53,5	24,9	78,9	552,1
1988	9,4	9,4	140,5	191,9	310,4	171,9	0,0	119,1	833,5
1989	0,0	0,0	71,6	73,6	210,6	162,5	36,9	79,3	555,2
1990	0,0	43,2	11,8	217,7	62,9	116,1	0,0	64,5	451,7
1991	7,5	101,7	137,6	124,1	179,4	21,9	21,1	84,8	593,3
1992	44,5	40,1	71,5	45,2	153,5	88,8	4,2	64,0	447,8
1993	0,0	0,0	104,3	163,5	187,0	28,4	0,0	69,0	483,2
1994	0,0	16,8	150,3	116,7	504,0	98,7	22,9	129,9	909,4
1995	0,0	6,7	74,8	84,7	222,5	49,4	0,0	62,6	438,1
1996	6,5	11,0	50,6	86,5	249,5	66,0	31,0	71,6	501,1
1997	0,0	15,5	99,5	106,0	68,3	87,6	0,0	53,8	376,9
1998	1,5	39,8	110,8	60,3	213,0	258,8	11,5	99,4	695,7
1999	9,5	10,0	31,5	145,3	241,5	203,5	6,7	92,6	648,0
2000	8,5	23,5	72,1	162,0	121,1	40,0	0,0	61,0	427,2
2001	0,0	35,7	75,6	165,0	114,6	56,0	0,0	63,8	446,9
2002	0,0	17,0	91,0	146,4	164,5	155,3	40,8	87,9	615,0

Tableau C.11 Idem que le tableau C1 mais pour la station d'Aribinda

<i>Années</i>	<i>avril</i>	<i>mai</i>	<i>juin</i>	<i>juillet</i>	<i>août</i>	<i>sep</i>	<i>oct</i>	<i>Moy/mois</i>	<i>Cumul/an</i>
1961	0,0	29,0	66,9	109,0	219,3	52,5	2,7	68	479
1962	0,0	20,8	59,9	183,0	149,4	83,2	32,1	75	528
1963	6,2	38,3	72,6	126,3	205,2	66,1	69,6	83	584
1964	0,0	40,3	80,7	141,7	233,2	29,8	22,4	78	548
1965	3,3	0,0	128,5	274,0	351,2	57,7	3,8	117	819
1966	0,0	128,2	50,5	155,3	108,8	46,6	59,0	78	548
1967	0,0	14,2	66,6	92,8	88,7	138,4	46,3	64	447
1968	19,6	10,4	24,0	70,4	142,6	85,4	10,2	52	363
1969	8,2	10,6	50,8	79,1	126,5	65,5	25,0	52	366
1970	1,0	20,2	1,0	145,5	188,8	81,9	0,0	63	438
1971	1,5	0,0	26,8	73,1	167,5	43,2	0,0	45	312
1972	0,0	1,5	72,0	18,0	103,8	12,5	41,4	36	249
1973	11,0	12,0	56,0	126,4	29,7	118,4	4,5	51	358
1974	0,0	1,0	59,7	143,6	129,9	69,8	4,0	58	408
1975	0,0	41,3	42,9	172,5	193,2	48,0	0,0	71	498
1976	0,0	74,2	37,6	125,2	111,2	79,7	81,8	73	510
1977	0,0	1,0	59,7	143,6	129,9	69,8	4,0	58	408
1978	0,0	41,3	42,9	172,5	193,2	48,0	0,0	71	498
1979	0,0	74,2	37,6	125,2	111,2	79,7	81,8	73	510
1980	0,0	5,4	76,9	73,9	147,0	35,1	8,2	50	347
1981	58,1	5,4	39,8	247,6	84,5	50,6	2,7	70	489
1982	0,0	35,2	29,3	111,2	133,9	35,3	25,6	53	370
1983	0,0	0,0	21,2	146,7	91,2	24,4	7,8	42	291
1984	0,0	2,5	96,5	97,2	132,0	62,9	0,0	56	391
1985	20,7	17,7	62,5	63,9	191,3	27,9	14,5	57	399
1986	0,0	9,1	16,5	46,3	120,1	60,7	10,9	38	264
1987	0,0	3,7	6,1	72,5	127,0	130,1	0,0	48	339
1988	0,0	2,6	40,0	49,2	234,8	42,4	4,8	53	374
1989	0,0	23,2	40,3	52,9	100,1	43,7	0,0	37	260
1990	0,0	0,0	41,4	50,9	18,5	164,1	1,0	39	276
1991	13,0	0,0	29,5	89,0	244,0	67,6	0,0	63	443
1992	0,0	2,3	8,7	124,1	213,0	41,4	8,2	57	398
1993	0,0	37,5	34,7	119,8	136,4	57,8	0,0	55	386
1994	0,0	28,5	35,6	78,4	335,5	100,9	51,2	90	630
1995	8,4	21,1	34,2	83,4	134,5	69,0	9,6	51	360
1996	0,0	42,7	21,8	51,2	129,8	85,0	0,0	47	331
1997	15,7	136,3	103,4	214,4	17,6	42,1	0,0	76	529
1998	0,0	81,0	78,5	111,7	184,1	2,0	0,0	65	457
1999	30,8	144,6	155,2	110,9	15,2	0,0	0,0	65	457
2000	6,4	66,8	119,4	158,4	50,6	16,7	0,0	60	418
2001	0,0	1,4	108,1	106,8	115,1	45,6	0,0	54	377
2002	50,2	65,9	138,0	120,2	69,4	5,4	0,0	64	449
2003	0,0	6,5	89,5	76,5	202,2	135,1	24,1	76	534
2004	8,4	57,0	122,0	43,0	73,8	62,5	0,0	52	367

Tableau C.12 Idem que le tableau C1 mais pour la station de Barsalogho

<i>Années</i>	<i>avril</i>	<i>mai</i>	<i>juin</i>	<i>juillet</i>	<i>août</i>	<i>sep</i>	<i>oct</i>	<i>Moy/mois</i>	<i>Cumul/an</i>
1961	0,0	60,6	100,1	188,2	345,1	122,2	0,0	121,1	816,2
1962	0,0	45,6	54,5	189,7	250,4	87,9	29,2	91,8	657,3
1963	40,5	79,6	169,7	116,8	167,2	183,2	52,8	59,2	809,8
1964	1,5	79,4	76,0	290,5	188,3	112,9	6,1	102,8	754,7
1965	0,0	31,2	72,6	163,1	195,0	148,4	10,5	79,5	620,8
1966	25,9	144,3	151,5	185,8	92,5	19,2	0,0	74,3	619,2
1967	8,6	28,9	62,0	142,9	222,1	100,1	0,0	80,6	564,6
1968	0,0	12,2	96,4	167,3	96,6	59,6	32,5	58,5	464,6
1969	0,0	29,2	94,7	136,7	202,0	142,2	92,7	69,1	697,5
1970	1,1	12,5	14,3	249,1	161,0	110,4	11,5	96,5	559,9
1971	1,5	10,6	116,0	73,2	155,4	71,3	0,0	60,5	428,0
1972	4,4	74,7	142,1	91,3	149,8	87,9	32,2	53,0	582,4
1973	25,0	79,8	68,2	127,7	114,1	94,5	0,0	46,3	509,3
1974	0,0	18,0	54,8	186,0	278,3	65,3	0,0	106,3	602,4
1975	0,0	24,1	31,8	266,9	153,9	139,4	10,0	100,0	626,1
1976	0,0	74,2	28,2	128,2	106,1	76,9	116,7	47,2	530,3
1977	0,0	23,3	77,3	92,9	194,4	48,2	9,5	67,1	445,6
1978	24,4	71,3	84,7	201,7	118,1	38,5	5,5	66,7	544,2
1979	0,0	33,7	55,1	63,6	251,2	96,5	7,0	85,6	507,1
1980	10,5	11,8	54,6	206,9	130,8	19,7	3,4	77,7	437,7
1981	0,0	28,2	39,1	72,3	161,0	121,0	0,0	61,5	421,6
1982	3,1	34,7	6,3	56,7	146,1	70,2	21,9	49,7	339,0
1983	0,0	24,5	64,8	132,0	138,9	33,6	8,7	57,1	402,5
1984	0,0	32,2	49,4	83,6	93,1	74,0	0,0	38,4	332,3
1985	0,0	23,3	26,1	64,5	210,0	36,7	2,0	73,1	362,6
1986	0,0	15,3	86,2	136,1	131,9	57,4	0,0	58,9	426,9
1987	0,0	0,0	105,7	81,7	59,0	110,3	0,0	50,5	356,7
1988	76,0	0,0	112,0	169,5	261,2	109,9	0,0	92,7	728,6
1989	0,0	9,1	27,0	146,5	107,3	78,6	6,5	57,6	375,0
1990	0,0	35,8	32,5	54,5	175,1	45,5	16,7	57,4	360,1
1991	15,5	35,8	78,9	109,3	355,0	0,0	0,0	126,0	594,5
1992	0,0	22,7	16,0	104,9	101,3	65,3	4,1	45,1	314,3
1993	0,0	6,2	120,6	113,7	188,8	78,9	15,2	71,3	523,4
1994	0,0	54,5	115,0	207,5	356,9	138,7	53,6	119,9	926,2
1995	12,0	13,9	118,7	114,6	155,0	48,8	25,8	58,5	488,8
1996	10,2	29,8	35,0	184,7	163,7	141,2	22,2	75,7	586,8
1997	5,3	38,6	31,7	109,2	74,5	27,9	9,1	37,2	296,3
1998	0,0	92,4	53,5	125,9	165,8	67,0	20,5	58,1	525,1
1999	5,1	0,0	41,9	78,1	267,2	110,9	0,0	96,1	503,2
2000	0,0	16,0	105,9	154,2	77,6	116,0	1,2	62,0	470,9
2001	0,0	7,0	223,8	204,5	115,7	0,0	0,0	101,6	551,0
2002	38,0	38,9	105,2	141,9	164,9	49,8	49,3	53,0	588,0
2003	1,4	36,7	89,8	112,6	227,8	161,0	71,7	76,2	701,0
2004	3,2	13,1	38,9	192,9	83,6	131,6	0,0	73,7	463,3

Tableau C.13 Idem que le tableau C1 mais pour la station de Dakiri

<i>Années</i>	<i>avril</i>	<i>mai</i>	<i>juin</i>	<i>juillet</i>	<i>août</i>	<i>sep</i>	<i>oct</i>	<i>Moy/mois</i>	<i>Cumul/an</i>
1962,0	0,0	29,6	134,9	192,1	289,3	140,4	25,2	115,9	811,5
1963,0	59,2	89,0	118,1	101,0	274,8	98,3	26,7	109,6	767,1
1964,0	71,0	40,2	149,9	282,1	234,2	116,7	30,5	132,1	924,6
1965,0	1,0	30,4	111,8	172,8	233,4	177,5	3,9	104,4	730,8
1966,0	0,0	84,2	122,2	89,4	182,9	110,6	26,5	88,0	615,8
1967,0	2,0	37,1	60,8	191,5	243,0	127,5	2,0	94,8	663,9
1968,0	40,6	54,3	73,9	139,1	64,5	109,6	12,7	70,7	494,7
1969,0	0,0	5,0	213,0	140,8	230,4	148,6	13,4	107,3	751,2
1970,0	0,0	24,5	43,8	124,6	205,8	73,4	0,0	67,4	472,1
1971,0	0,0	20,0	33,4	91,3	132,0	92,0	0,0	52,7	368,7
1972,0	0,0	0,0	21,7	134,3	86,8	91,1	38,4	53,2	372,3
1973,0	15,6	53,1	69,6	203,0	118,4	121,5	0,0	83,0	581,2
1974,0	0,0	36,7	23,3	273,6	193,0	82,7	10,5	88,5	619,8
1975,0	5,5	16,0	46,5	159,9	85,0	97,0	9,5	59,9	419,4
1976,0	12,0	44,5	55,2	145,5	199,4	97,3	102,8	93,8	656,7
1977,0	0,0	42,0	19,8	91,0	99,9	77,4	0,0	47,2	330,1
1978,0	46,8	12,8	94,3	132,7	172,8	64,2	14,7	76,9	538,3
1979,0	21,5	2,6	94,8	118,7	170,8	49,5	39,3	71,0	497,2
1980,0	2,5	28,0	156,9	146,4	221,0	42,3	16,3	87,6	613,4
1981,0	0,0	34,9	54,6	115,8	118,5	210,8	0,0	76,4	534,6
1982,0	0,0	109,9	81,1	45,5	152,6	90,9	86,1	80,9	566,1
1983,0	0,0	3,2	75,6	99,7	92,4	49,1	32,8	50,4	352,8
1984,0	0,0	23,4	44,0	48,1	111,8	107,4	0,0	47,8	334,7
1985,0	0,0	0,0	57,9	160,0	224,3	103,3	0,0	77,9	545,5
1986,0	0,0	27,3	54,6	79,6	95,8	80,2	7,6	49,3	345,1
1987,0	0,0	0,0	85,1	123,6	159,4	125,6	0,0	70,5	493,7
1988,0	3,9	7,3	106,8	136,0	250,9	110,2	0,0	87,9	615,1
1989,0	0,0	10,6	6,4	122,6	188,6	67,0	24,1	59,9	419,3
1990,0	4,0	19,0	31,4	99,4	122,0	90,4	2,5	52,7	368,7
1991,0	0,0	81,9	64,1	98,5	318,1	21,1	28,2	87,4	611,9
1992,0	2,0	27,7	23,2	172,1	148,9	42,3	0,0	59,5	416,2
1993,0	0,0	0,0	68,3	82,8	178,8	57,5	24,7	58,9	412,1
1994,0	1,6	80,6	109,1	126,8	105,0	120,0	64,1	86,7	607,2
1995,0	9,5	7,0	78,4	64,1	276,2	20,9	14,8	67,3	470,9
1996,0	3,7	68,4	54,3	151,4	151,0	119,2	6,5	79,2	554,5
1997,0	0,0	66,9	46,4	77,5	129,9	98,6	16,2	62,2	435,5
1998,0	14,0	68,9	104,8	201,3	102,3	120,9	34,7	92,4	646,9
1999,0	0,0	63,1	13,7	82,0	137,8	100,9	0,0	56,8	397,5
2000,0	0,0	0,0	27,6	206,5	44,5	90,9	17,7	55,3	387,2
2001,0	0,0	8,5	76,4	74,4	187,7	119,9		77,8	466,9
2002,0	0,0	0,0	99,2	102,0	209,9	86,5	75,7	81,9	573,3
2003,0	0,0	48,0	212,5	160,2	184,9	330,4	9,0	135,0	945,0
2004,0	2,5	0,0	34,6	221,0	94,4	109,0	0,0	65,9	461,5

Tableau C.14 Idem que le tableau C1 mais pour la station de Dori

<i>Années</i>	<i>avril</i>	<i>mai</i>	<i>juin</i>	<i>juillet</i>	<i>août</i>	<i>sep</i>	<i>oct</i>	<i>Moy/mois</i>	<i>Cumul/an</i>
1961	3,5	43,2	128,9	118,8	295,5	60,0	1,2	93,0	651,1
1962	2,7	14,7	67,5	95,7	263,9	41,6	13,6	71,4	499,7
1963	4,3	54,6	213,2	216,5	115,2	106,4	11,9	103,2	722,1
1964	0,0	33,3	154,8	132,0	236,5	77,8	6,7	91,6	641,1
1965	1,9	20,2	35,6	120,0	201,1	113,3	37,9	75,7	530,0
1966	0,0	47,5	123,3	120,7	203,0	205,7	21,9	103,2	722,1
1967	5,2	3,5	29,6	58,1	211,1	93,3	0,0	57,3	400,8
1968	15,6	9,7	76,0	122,8	56,0	57,0	15,8	50,4	352,9
1969	4,0	21,7	138,3	99,8	183,9	94,6	62,0	86,3	604,3
1970	1,0	18,4	14,8	92,4	83,8	163,4	0,0	53,4	373,8
1971	0,0	2,1	59,9	105,2	145,8	47,1	0,0	51,4	360,1
1972	0,0	6,1	123,5	82,0	79,4	32,0	18,6	48,8	341,6
1973	0,0	8,8	11,0	90,1	164,5	54,6	0,0	47,0	329,0
1974	0,0	20,9	41,3	188,0	150,3	53,2	17,2	67,3	470,9
1975	0,0	42,7	11,0	94,0	112,2	62,7	0,0	46,1	322,6
1976	20,4	42,0	50,4	125,6	173,5	88,4	96,0	85,2	596,3
1977	0,0	4,0	21,3	125,1	142,5	75,1	0,0	52,6	368,0
1978	41,0	28,4	99,3	232,5	65,5	52,8	2,6	74,6	522,1
1979	0,0	21,9	71,5	43,1	110,6	109,9	20,4	53,9	377,4
1980	0,0	0,0	64,4	224,2	102,3	7,9	0,0	57,0	398,8
1981	10,6	14,5	72,1	116,9	122,9	63,9	0,0	57,3	400,9
1982	16,9	8,1	69,2	74,7	187,2	16,1	27,3	57,1	399,5
1983	0,0	11,0	32,3	82,0	188,4	25,8	1,8	48,8	341,3
1984	0,0	19,9	23,6	34,4	49,2	177,0	0,0	43,4	304,1
1985	0,0	18,1	34,2	59,4	299,6	57,4	0,0	67,0	468,7
1986	0,0	19,4	45,7	51,1	147,4	43,3	0,0	43,8	306,9
1987	0,0	0,0	43,1	117,7	27,5	66,5	0,0	36,4	254,8
1988	25,1	0,0	68,6	161,1	275,0	46,2	0,0	82,3	576,0
1989	0,0	0,0	18,5	127,6	250,7	54,5	12,9	66,3	464,2
1990	0,0	20,0	65,3	122,5	180,6	55,6	0,0	63,4	444,0
1991	11,1	74,1	82,5	73,0	176,3	60,1	0,0	68,2	477,1
1992	0,0	20,3	83,1	62,0	290,6	41,2	4,2	71,6	501,4
1993	0,0	3,4	59,4	46,0	99,3	55,1	15,8	39,9	279,0
1994	0,0	12,5	41,0	136,2	226,1	76,4	39,3	75,9	531,5
1995	0,0	7,1	57,1	107,0	157,3	73,9	12,7	59,3	415,1
1996	11,0	19,4	58,4	68,4	109,1	69,8	2,1	48,3	338,2
1997	3,4	52,9	18,2	187,6	122,2	62,1	15,8	66,0	462,2
1998	0,0	1,9	54,6	169,0	77,9	168,1	2,3	67,7	473,8
1999	0,0	9,5	52,9	144,9	162,4	103,4	0,0	67,6	473,1
2000	0,0	3,5	66,0	81,0	120,3	67,0	0,0	48,3	337,8
2001	0,0	12,6	23,4	104,4	164,3	68,2	13,9	55,3	386,8
2002	10,5	28,5	87,3	85,9	85,8	47,3	56,4	57,4	401,7
2003	1,0	52,8	84,4	172,6	190,2	124,4	39,8	95,0	665,2
2004	0,0	18,2	29,9	117,8	77,9	51,0	12,8	43,9	307,6

Tableau C.15 Idem que le tableau C1 mais pour la station de Kollo

<i>Années</i>	<i>avril</i>	<i>mai</i>	<i>juin</i>	<i>juillet</i>	<i>août</i>	<i>sep</i>	<i>oct</i>	<i>Moy/mois</i>	<i>Cumul/an</i>
1961	0,0	32,3	123,1	232,5	163,9	146,7	0,0	99,8	698,5
1962	19,2	9,5	36,0	310,2	170,4	56,7	23,8	89,4	625,8
1963	15,4	52,5	61,0	338,7	149,4	285,7	0,0	129,0	902,7
1964	4,7	46,5	64,0	199,7	123,5	199,2	11,0	92,7	648,6
1965	1,5	5,5	129,3	233,7	101,9	152,5	2,7	89,6	627,1
1966	8,0	16,0	128,2	116,4	109,3	119,7	60,3	79,7	557,9
1967	11,1	0,0	76,6	254,5	214,0	231,7	0,0	112,6	787,9
1968	0,0	21,6	181,1	151,9	118,5	37,7	24,7	76,5	535,5
1969	0,0	13,1	115,8	145,3	250,1	84,1	19,6	89,7	628,0
1970	7,9	0,0	4,1	194,9	81,0	69,2	0,0	51,0	357,1
1971	0,0	1,3	26,5	88,7	234,7	33,0	30,0	59,2	414,2
1972	9,3	11,2	48,1	52,0	81,9	49,6	8,9	37,3	261,0
1973	2,8	1,7	8,2	126,7	160,5	89,0	0,0	55,6	388,9
1974	0,0	3,5	32,9	229,2	188,6	58,8	38,5	78,8	551,5
1975	10,2	47,1	70,4	340,3	197,8	141,2	0,0	115,3	807,0
1976	0,0	53,3	50,2	125,6	225,0	103,4	40,4	85,4	597,9
1977	0,0	35,9	49,8	240,4	168,9	68,2	0,0	80,5	563,2
1978	46,6	3,0	146,0	139,0	175,2	60,1	22,2	84,6	592,1
1979	0,0	20,4	51,9	179,2	189,6	40,4	0,0	68,8	481,5
1980	0,0	41,3	139,4	86,1	154,5	78,2	2,0	71,6	501,5
1981	0,0	19,9	52,0	248,2	76,5	41,4	0,0	62,6	438,0
1982	0,0	10,8	71,4	37,3	100,3	46,4	20,6	41,0	286,8
1983	0,0	99,9	142,4	96,3	63,6	136,6	2,9	77,4	541,7
1984	0,0	45,7	32,0	40,9	51,9	37,6	0,0	29,7	208,1
1985	0,0	0,0	49,1	133,1	152,4	81,1	0,0	59,4	415,7
1986	0,0	89,1	26,1	90,3	158,2	130,7	21,0	73,6	515,4
1987	0,0	1,0	10,3	146,6	176,1	70,7	12,0	59,5	416,7
1988	7,1	0,0	96,1	146,6	210,7	161,5	0,0	88,9	622,0
1989	0,0	5,0	40,6	83,3	278,4	114,0	11,5	76,1	532,8
1990	0,0	69,2	75,8	99,9	83,3	110,7	0,0	62,7	438,9
1991	11,5	63,8	80,3	69,8	203,6	22,2	27,0	68,3	478,2
1992	3,8	8,0	79,0	124,6	206,5	49,3	0,0	67,3	471,2
1993	0,0	14,5	61,1	135,8	196,9	41,9	0,0	64,3	450,2
1994	0,0	32,4	112,2	188,2	264,1	99,7	17,7	102,0	714,3
1995	0,0	0,0	47,7	161,8	251,9	93,9	0,0	79,3	555,3
1996	0,0	0,0	102,0	86,6	203,2	57,3	19,9	67,0	469,0
1997	0,0	12,7	70,6	141,9	30,9	21,5	0,0	39,7	277,6
1998	1,0	68,3	128,9	137,1	169,6	296,9	0,0	114,5	801,8
1999	1,4	28,3	100,2	76,3	182,0	201,5	5,7	85,1	595,4
2000	0,0	1,9	73,3	220,0	139,6	18,5	32,4	69,4	485,7
2001	0,0	20,4	90,8	103,5	96,3	58,1	3,0	53,2	372,1
2002	0,0	10,0	79,1	118,2	194,5	111,0	31,2	77,7	544,0

Tableau C.16 Idem que le tableau C1 mais pour la station de Téra

<i>Années</i>	<i>avril</i>	<i>mai</i>	<i>juin</i>	<i>juillet</i>	<i>août</i>	<i>sep</i>	<i>oct</i>	<i>Moy/mois</i>	<i>Cumul/an</i>
1961	0,0	56,0	62,1	137,9	397,3	47,9	0,0	100,2	701,2
1962	0,0	7,2	36,0	132,5	168,1	43,2	11,6	56,9	398,6
1963	0,0	71,2	68,7	82,7	127,8	52,4	18,7	60,2	421,5
1964	14,5	10,5	150,2	195,2	234,5	87,1	0,0	98,9	692,0
1965	0,0	15,0	71,6	111,9	151,5	146,5	9,5	72,3	506,0
1966	0,0	17,4	56,6	68,5	148,0	67,5	24,5	54,6	382,5
1967	1,6	29,1	51,4	106,8	186,6	149,1	0,0	74,9	524,6
1968	45,1	32,9	73,7	89,1	104,6	55,0	0,0	57,2	400,4
1969	0,0	9,0	3,9	117,0	119,8	106,3	26,0	54,6	382,0
1970	4,0	13,4	40,8	53,6	138,9	82,9	0,0	47,7	333,6
1971	0,0	2,8	68,1	108,0	99,2	22,9	0,0	43,0	301,0
1972	0,0	22,2	49,0	82,1	136,1	19,3	20,4	47,0	329,1
1973	1,0	29,8	71,0	128,9	120,7	49,7	0,0	57,3	401,1
1974	0,0	5,3	13,5	150,3	66,1	70,2	2,0	43,9	307,4
1975	0,0	9,4	42,2	190,1	37,7	99,2	5,0	54,8	383,6
1976	1,6	86,8	27,0	97,8	88,2	74,8	43,3	59,9	419,5
1977	0,0	10,9	18,8	158,6	197,5	46,5	0,0	61,8	432,3
1978	39,7	0,0	98,1	124,3	84,3	74,6	3,1	60,6	424,1
1979	0,0	23,4	76,9	100,4	179,8	103,2	13,4	71,0	497,1
1980	0,0	1,2	144,3	142,4	75,9	3,2	16,3	54,8	383,3
1981	28,8	18,9	17,9	133,3	71,5	71,2	0,0	48,8	341,6
1982	0,0	2,0	38,7	39,5	117,5	0,0	3,0	28,7	200,7
1983	0,0	0,0	28,5	119,3	81,0	8,9	0,0	34,0	237,7
1984	0,0	7,2	30,1	47,5	33,9	103,5	0,0	31,7	222,2
1985	0,0	0,0	46,3	116,6	127,3	56,0	0,0	49,5	346,2
1986	4,9	7,3	87,6	41,9	82,1	69,4	0,0	41,9	293,2
1987	0,0	10,0	18,2	87,3	83,2	78,3	0,0	39,6	277,0
1988	49,0	0,0	103,7	71,8	252,2	24,3	0,0	71,6	501,0
1989	0,0	7,5	26,4	72,5	250,7	44,8	0,0	57,4	401,9
1990	0,0	16,3	35,4	151,8	105,6	28,6	0,0	48,2	337,7
1991	0,0	117,2	33,3	113,2	195,2	29,3	17,7	72,3	505,9
1992	0,0	73,2	59,2	69,9	270,1	48,5	2,0	74,7	522,9
1993	0,0	0,0	38,9	62,6	97,1	58,8	0,0	36,8	257,4
1994	0,0	6,5	52,3	58,7	230,6	209,3	2,1	79,9	559,5
1995	0,0	5,3	108,8	98,9	237,3	45,2	0,0	70,8	495,5
1996	3,3	21,6	38,1	108,6	116,7	96,3	21,7	58,0	406,3
1997	0,0	12,0	4,8	96,9	58,9	62,8	4,3	34,2	239,7
1998	0,0	5,3	51,2	78,1	118,8	148,4	0,0	57,4	401,8
1999	0,0	11,2	39,7	135,1	103,8	98,9	0,0	55,5	388,7
2000	0,0	0,0	99,8	68,6	102,8	64,8	1,5	48,2	337,5
2001	0,0	47,4	71,3	59,6	108,5	168,5	0,0	65,0	455,3
2002	0,0	13,3	123,7	79,0	114,1	124,8	18,2	67,6	473,1

Tableau C.17 Idem que le tableau C1 mais pour la station de Sebba

<i>Années</i>	<i>avril</i>	<i>mai</i>	<i>juin</i>	<i>juillet</i>	<i>août</i>	<i>sep</i>	<i>oct</i>	<i>Moy/mois</i>	<i>Cumul/an</i>
1961	0,0	56,0	62,1	137,9	397,3	47,9	0,0	100,2	701,2
1962	0,0	7,2	36,0	132,5	168,1	43,2	11,6	56,9	398,6
1963	0,0	71,2	68,7	82,7	127,8	52,4	18,7	60,2	421,5
1964	14,5	10,5	150,2	195,2	234,5	87,1	0,0	98,9	692,0
1965	0,0	15,0	71,6	111,9	151,5	146,5	9,5	72,3	506,0
1966	0,0	17,4	56,6	68,5	148,0	67,5	24,5	54,6	382,5
1967	1,6	29,1	51,4	106,8	186,6	149,1	0,0	74,9	524,6
1968	45,1	32,9	73,7	89,1	104,6	55,0	0,0	57,2	400,4
1969	0,0	9,0	3,9	117,0	119,8	106,3	26,0	54,6	382,0
1970	4,0	13,4	40,8	53,6	138,9	82,9	0,0	47,7	333,6
1971	0,0	2,8	68,1	108,0	99,2	22,9	0,0	43,0	301,0
1972	0,0	22,2	49,0	82,1	136,1	19,3	20,4	47,0	329,1
1973	1,0	29,8	71,0	128,9	120,7	49,7	0,0	57,3	401,1
1974	0,0	5,3	13,5	150,3	66,1	70,2	2,0	43,9	307,4
1975	0,0	9,4	42,2	190,1	37,7	99,2	5,0	54,8	383,6
1976	1,6	86,8	27,0	97,8	88,2	74,8	43,3	59,9	419,5
1977	0,0	10,9	18,8	158,6	197,5	46,5	0,0	61,8	432,3
1978	39,7	0,0	98,1	124,3	84,3	74,6	3,1	60,6	424,1
1979	0,0	23,4	76,9	100,4	179,8	103,2	13,4	71,0	497,1
1980	0,0	1,2	144,3	142,4	75,9	3,2	16,3	54,8	383,3
1981	28,8	18,9	17,9	133,3	71,5	71,2	0,0	48,8	341,6
1982	0,0	2,0	38,7	39,5	117,5	0,0	3,0	28,7	200,7
1983	0,0	0,0	28,5	119,3	81,0	8,9	0,0	34,0	237,7
1984	0,0	7,2	30,1	47,5	33,9	103,5	0,0	31,7	222,2
1985	0,0	0,0	46,3	116,6	127,3	56,0	0,0	49,5	346,2
1986	4,9	7,3	87,6	41,9	82,1	69,4	0,0	41,9	293,2
1987	0,0	10,0	18,2	87,3	83,2	78,3	0,0	39,6	277,0
1988	49,0	0,0	103,7	71,8	252,2	24,3	0,0	71,6	501,0
1989	0,0	7,5	26,4	72,5	250,7	44,8	0,0	57,4	401,9
1990	0,0	16,3	35,4	151,8	105,6	28,6	0,0	48,2	337,7
1991	0,0	117,2	33,3	113,2	195,2	29,3	17,7	72,3	505,9
1992	0,0	73,2	59,2	69,9	270,1	48,5	2,0	74,7	522,9
1993	0,0	0,0	38,9	62,6	97,1	58,8	0,0	36,8	257,4
1994	0,0	6,5	52,3	58,7	230,6	209,3	2,1	79,9	559,5
1995	0,0	5,3	108,8	98,9	237,3	45,2	0,0	70,8	495,5
1996	3,3	21,6	38,1	108,6	116,7	96,3	21,7	58,0	406,3
1997	0,0	12,0	4,8	96,9	58,9	62,8	4,3	34,2	239,7
1998	0,0	5,3	51,2	78,1	118,8	148,4	0,0	57,4	401,8
1999	0,0	11,2	39,7	135,1	103,8	98,9	0,0	55,5	388,7
2000	0,0	0,0	99,8	68,6	102,8	64,8	1,5	48,2	337,5
2001	0,0	47,4	71,3	59,6	108,5	168,5	0,0	65,0	455,3
2002	0,0	13,3	123,7	79,0	114,1	124,8	18,2	67,6	473,1

ANNEXE D : MOYENNES MENSUELLES DES INDICES PLUVIOMÉTRIQUES

CALCULÉS D'AVRIL À OCTOBRE SUR LA PÉRIODE 1961-2004

Tableau D.1 Station de Zorgho

<i>Années</i>	<i>Prcpl</i>	<i>SDII</i>	<i>CDD</i>	<i>Max3d</i>	<i>Prcp90</i>	<i>Pwj>90p</i>
Zorgho	(%/jour/mois)	(mm/jour)	jour/mois	mm/jour	mm/jour	jour/mois
1961	27	14,1	6	40,2	45,6	9
1962	26	13,4	8	41,6	39,3	7
1963	30	12,7	5	52,3	52,8	10
1964	24	17,8	6	54,3	42,0	7
1965	23	17,8	7	47,0	36,6	7
1966	26	13,3	6	39,3	48,3	9
1967	24	15,4	6	46,2	39,3	8
1968	24	15,1	10	41,9	41,1	8
1969	20	17,4	7	43,7	36,6	7
1970	21	14,0	10	37,2	30,3	8
1971	21	13,1	10	33,8	33,0	7
1972	20	17,5	14	33,4	26,7	7
1973	20	12,9	11	26,1	29,4	5
1974	21	14,1	11	36,5	29,4	5
1975	18	16,5	12	42,8	26,7	5
1976	18	15,0	10	28,6	28,5	5
1977	22	12,4	8	36,6	38,4	5
1978	23	11,4	9	33,5	40,2	7
1979	23	11,9	8	35,0	35,7	7
1980	19	14,8	7	30,9	34,8	7
1981	23	10,3	6	23,3	40,2	8
1982	17	12,8	8	20,4	32,1	7
1983	23	11,7	6	25,9	42,0	8
1984	17	13	7	26	37	7
1985	16	16,9	10	26,8	37,5	3
1986	17	14,1	9	25,8	33,0	6
1987	16	14,1	10	28,2	29,4	6
1988	19	16,0	10	35,9	30,3	6
1989	24	14,5	7	40,4	42,0	8
1990	19	16,1	11	35,1	33,0	7
1991	27	16,4	7	55,1	41,1	6
1992	23	15,2	8	34,2	46,5	7
1993	20	13,1	8	36,8	33,0	6
1994	21	14	10	38	36	7
1995	23	15,3	6	34,9	40,2	8
1996	27	11,2	5	31,2	49,2	9
1997	21	11,1	8	28,0	35,7	7
1998	20	11,9	9	26,5	35,7	6
1999	21	18,0	7	34,5	35,7	7
2000	22	11,1	8	29,7	38,4	7
2001	21	10,8	8	25,3	37,5	6
2002	21	17,3	6	33,0	36,6	7
2003	22	13,2	6	33,6	39,3	7
2004	25	13,6	6	36,9	40	8

Tableau D.2 Idem que le tableau D1 mais pour la station de Fada N'Gourma

<i>Années</i>	<i>Prcpl</i> (%/jour/mois)	<i>SDII</i> (mm/jour)	<i>CDD</i> jour/mois	<i>Max3d</i> mm/jour	<i>Prcp90</i> mm/jour	<i>Pwj>90p</i> jour/mois
1961	31	15,0	10	43,0	46,0	8
1962	31	15,0	11	39,0	44,0	9
1963	38	13,0	8	47,0	46,0	11
1964	33	12,0	11	50,0	42,0	8
1965	30	11,0	8	46,0	41,0	7
1966	28	13,0	9	37,0	36,0	7
1967	26	12,0	8	37,0	37,0	7
1968	29	17,0	8	45,0	36,0	7
1969	26	15,0	9	46,0	37,0	7
1970	26	11,0	12	35,0	40,0	7
1971	28	11,0	12	33,0	38,0	7
1972	27	14,0	8	43,0	32,0	7
1973	24	13,0	13	33,0	37,0	7
1974	24	12,0	12	39,0	31,0	5
1975	23	15,0	11	46,0	35,0	7
1976	27	12,0	8	35,0	36,0	8
1977	26	15,0	13	49,0	36,0	6
1978	29	11,0	8	34,0	33,0	7
1979	28	12,0	9	38,0	35,0	8
1980	24	11,0	9	32,0	30,0	8
1981	24	13,0	11	35,0	38,0	7
1982	21	11,0	8	41,0	26,0	6
1983	25	14,0	13	35,0	40,0	7
1984	20	13,6	9,0	33,2	33,5	7
1985	26	12,0	13	38,0	25,0	7
1986	25	13,0	11	31,0	34,0	5
1987	20	13,0	13	31,0	37,0	7
1988	26	13,0	11	33,0	34,0	6
1989	25	15,0	12	29,0	36,0	6
1990	24	11,0	10	33,0	42,0	7
1991	27	16,0	9	48,0	36,0	7
1992	27	16,0	9	40,0	42,0	7
1993	27	16,0	9	40,0	36,0	8
1994	27	16,2	9	48	41,6	8
1995	24	12,0	9	48,0	38,0	7
1996	28	16,0	9	39,0	42,0	7
1997	27	13,0	10	27,0	36,0	7
1998	29	10,0	11	27,0	42,0	8
1999	26	9,0	9	32,0	33,0	7
2000	32	9,0	9	42,0	35,0	10
2001	22	14,0	11	35,0	31,0	5
2002	22	16,0	14	40,0	37,0	7
2003	23	11,0	9	35,0	37,0	6
2004	26	13,8	7,2	39,2	46,1	10

Tableau D.3 Idem que le tableau D1 mais pour la station de Koupela

<i>Années</i>	<i>Prcpl</i> (%/jour/mois)	<i>SDII</i> (mm/jour)	<i>CDD</i> jour/mois	<i>Max3d</i> mm/jour	<i>Prcp90</i> mm/jour	<i>Pwj>90p</i> jour/mois
1961	23	16,2	6	46,8	44,7	7
1962	29	14,4	6	42,1	49,2	9
1963	29	14,4	6	42,1	49,2	9
1964	26	10,6	5	33,4	47,4	8
1965	27	12,3	6	38,9	48,3	8
1966	28	15,7	6	48,0	45,6	8
1967	29	9,8	5	35,4	41,1	9
1968	24	14,8	6	51,3	39,3	7
1969	25	11,3	7	34,2	41,1	7
1970	20	11,1	11	29,4	38,4	6
1971	26	12,1	6	36,0	47,4	8
1972	25	11,8	10	30,1	41,1	7
1973	21	12,8	8	31,3	34,8	6
1974	25	16,6	8	40,6	44,7	7
1975	20	16,0	7	38,7	37,5	6
1976	26	17,5	8	51,8	40,2	8
1977	21	14,4	7	29,7	39,3	6
1978	23	14,8	9	38,7	36,6	7
1979	23	18,8	7	47,2	41,1	7
1980	23	12,7	8	38,9	39,3	7
1981	22	14,8	7	41,3	40,2	7
1982	22	10,8	6	25,5	40,2	6
1983	19	21,0	8	38,1	35,7	6
1984	20	11,3	8	27,7	36,2	6
1985	19	11,5	8	25,1	35,7	5
1986	21	15,9	8	38,8	35,7	6
1987	17	18,6	8	32,4	29,4	5
1988	22	16,8	6	41,7	40,2	7
1989	21	16,1	9	35,5	37,5	6
1990	20	16,8	8	38,2	36,6	6
1991	24	15,4	9	48,7	39,3	7
1992	22	13,5	7	42,1	40,2	7
1993	24	15,2	8	44,0	41,1	7
1994	30	17,7	11	44	48	9
1995	22	11,8	7	26,9	37,5	7
1996	23	13,5	8	46,4	37,5	7
1997	20	8,2	11	21,4	32,1	6
1998	22	17,8	8	45,2	36,6	6
1999	26	10,5	5	31,1	45,6	10
2000	23	13,2	9	30,6	40,2	7
2001	17	8,5	12	22,1	33,0	5
2002	23	13,7	10	37,3	35,7	7
2003	24	16,0	8	44,5	41,1	7
2004	24	17,7	11	44	43	7

Tableau D.4 Idem que le tableau D1 mais pour la station de Boulsa

<i>Années</i>	<i>Prcpl</i>	<i>SDII</i>	<i>CDD</i>	<i>Max3d</i>	<i>Prcp90</i>	<i>Pwj>90p</i>
	(%/jour/mois)	(mm/jour)	jour/mois	mm/jour	mm/jour	jour/mois
1961	21	11,8	8	33,1	40,2	6
1962	27	15,5	8	43,4	47,4	8
1963	26	10,8	9	42,1	45,6	8
1964	29	15,3	7	55,4	46,5	8
1965	25	16,0	6	48,2	47,4	7
1966	27	11,6	5	32,6	47,4	8
1967	26	12,2	7	34,5	50,1	8
1968	30	13,3	6	48,0	48,3	9
1969	22	11,5	8	32,7	42,0	6
1970	21	9,5	9	24,9	40,2	6
1971	17	10,5	7	23,2	32,1	5
1972	22	11,1	8	28,4	42,9	7
1973	20	16,9	9	47,9	38,4	6
1974	20	15,6	8	31,8	39,3	6
1975	24	10,1	6	33,1	46,5	7
1976	25	16,7	6	51,3	48,3	7
1977	19	17,8	10	28,2	35,7	6
1978	24	11,2	8	30,0	35,7	7
1979	22	21,9	7	42,9	46,5	6
1980	19	11,2	8	26,9	36,6	6
1981	23	14,9	9	37,5	44,7	7
1982	19	12,1	8	28,5	35,7	6
1983	18	14,3	9	32,1	34,8	5
1984	21	11,4	8	31,6	37,1	6
1985	16	11,0	10	24,1	30,3	5
1986	20	15,1	8	31,6	39,3	6
1987	18	15,2	9	31,1	33,9	5
1988	21	15,8	9	32,9	40,2	6
1989	20	12,0	10	30,5	38,4	6
1990	19	12,5	7	30,1	35,7	6
1991	20	15,9	12	42,0	37,5	6
1992	19	14,4	8	35,8	36,6	6
1993	18	15,6	10	29,0	33,9	5
1994	28	14,1	8,3	33,3	42,8	8
1995	22	12,4	6	29,8	42,0	6
1996	23	11,9	7	36,8	44,7	7
1997	17	10,7	9	25,3	32,1	5
1998	19	14,6	10	32,9	35,7	6
1999	23	14,5	8	32,1	44,7	7
2000	16	8,0	11	14,4	30,3	5
2001	13	14,4	10	20,1	24,9	4
2002	19	14,0	11	28,9	36,6	6
2003	24	10,2	8	29,8	46,5	7
2004	20	9,7	9	21,8	36	7

Tableau D.5 Idem que le tableau D1 mais pour la station de Bilanga

<i>Années</i>	<i>Prcpl</i> (%/jour/mois)	<i>SDII</i> (mm/jour)	<i>CDD</i> jour/mois	<i>Max3d</i> mm/jour	<i>Prcp90</i> mm/jour	<i>Pwj>90p</i> jour/mois
1968	35	10,6	6,3	41,8	40	10
1969	35	8,2	6,9	35,9	41	10
1970	20	12,2	9,0	49,0	27	6
1971	15	13,2	10,2	34,3	22	5
1972	22	11,6	9,8	37,8	26	6
1973	20	11,6	7,8	40,7	28	6
1974	19	17,6	6,6	27,7	28	6
1975	20	13,6	7,0	20,5	28	6
1976	25	15,1	9,4	35,6	32	7
1977	20	18,2	8,6	32,9	30	6
1978	14	23,2	9,2	35,7	16	4
1979	14	24,6	9,4	33,4	19	4
1980	12	20,4	12,2	33,8	17	4
1981	16	15,8	7,8	45,0	20	5
1982	17	11,6	9,0	32,2	21	5
1983	16	13,3	9,0	42,4	24	5
1984	16	16,6	10,6	32,4	19	5
1985	14	13,9	12,4	38,5	22	4
1986	18	14,3	8,8	35,9	23	5
1987	19	13,3	11,4	43,3	27	6
1988	18	21,1	8,6	36,2	24	5
1989	19	13,2	9,6	43,0	28	6
1990	20	15,5	9,2	28,4	25	6
1991	20	15,0	9,4	38,6	22	6
1992	24	12,1	7,0	36,5	32	7
1993	18	19,5	10,4	48,1	27	5
1994	23	18,0	7,2	26,4	28	7
1995	20	15,2	7,4	35,6	28	6
1996	21	12,7	8,8	37,7	29	6
1997	14	11,3	8,0	43,8	24	5
1998	20	13,6	7,8	30,0	26	6
1999	25	11,8	6,2	28,4	30	7
2000	19	14,6	10,4	37,4	26	6
2001	19	10,5	8,4	19,8	22	5
2002	20	12,3	9,6	26,7	22	6
2003	22	16,9	6,6	29,3	27	6
2004	22	19,1	8,0	34,0	29	7

Tableau D.6 Idem que le tableau D1 mais pour la station de Gayeri

<i>Années</i>	<i>Prcpl</i> (%/jour/mois)	<i>SDII</i> (mm/jour)	<i>CDD</i> jour/mois	<i>Max3d</i> mm/jour	<i>Prcp90</i> mm/jour	<i>Pwj>90p</i> jour/mois
1968	35	8,4	4,2	27,6	47	10
1969	35	7,7	4,4	27,6	51	10
1970	31	7,8	4,2	24,9	51	9
1971	20	14,4	6,4	35,1	36	6
1972	21	15,4	10,2	44,0	29	6
1973	21	14,9	6,8	40,2	35	6
1974	22	12,7	7,8	31,1	39	7
1975	17	18,7	10,2	35,8	29	5
1976	25	12,6	8,4	37,7	34	7
1977	24	12,0	8,8	27,6	41	7
1978	23	13,9	7,6	39,8	34	7
1979	24	9,8	6,6	25,0	37	7
1980	19	8,1	9,2	33,4	28	6
1981	15	11,0	7	25,9	30	4
1982	15	11,4	10,8	24,1	25	4
1983	12	14,5	12,6	24,0	26	4
1984	16	17,7	9,8	30,4	30	4
1985	15	11,2	9,2	29,1	31	4
1986	18	13,0	7,4	23,4	36	5
1987	12	14,1	10,4	21,2	22	3
1988	21	13,3	8,4	44,7	39	6
1989	18	12,8	9,2	34,7	36	5
1990	13	14,8	12	29,5	26	4
1991	18	18,1	9,8	45,3	29	5
1992	16	18,1	8,6	34,8	29	5
1993	13	14,9	10,4	35,8	26	4
1994	20	12,3	8,6	48,6	27	7
1995	20	13,3	8,2	30,0	36	6
1996	18	12,0	14	30,6	26	5
1997	8	6,6	18,8	9,4	20	3
1998	19	7,3	15,4	20,6	37	6
1999	27	10,1	7	42,5	48	8
2000	20	12,5	8,8	27,6	37	6

Tableau D.7 Idem que le tableau D1 mais pour la station de Piela

<i>Années</i>	<i>Prcpl</i> (%/jour/mois)	<i>SDII</i> (mm/jour)	<i>CDD</i> jour/mois	<i>Max3d</i> mm/jour	<i>Prcp90</i> mm/jour	<i>Pwj>90p</i> jour/mois
1961	22	9,6	9	37,8	44,3	7
1962	29	15,4	5	46,0	54,2	10
1963	25	15,8	8	37,7	40,7	8
1964	27	12,7	7	46,6	49,7	10
1965	20	19,2	7	54,1	39,8	7
1966	20	20,5	8	44,5	34,4	6
1967	19	16,4	9	34,0	36,2	5
1968	24	15,0	8	41,8	43,4	6
1969	20	13,3	7	30,2	37,1	6
1970	21	11,6	11	39,2	41,6	6
1971	17	14,3	9	25,4	32,6	6
1972	16	9,9	10	35,4	28,1	5
1973	22	16,4	9	29,6	41,6	5
1974	23	13,2	6	31,3	42,5	7
1975	17	11,9	11	37,2	33,5	6
1976	27	18,2	8	52,2	44,3	8
1977	12	21,7	15	33,8	26,3	4
1978	18	23,2	9	34,2	32,6	6
1979	15	17,3	10	24,0	29	5
1980	15	9,2	9	32,6	28,1	5
1981	16	13,8	10	32,4	30,8	6
1982	18	15,5	9	35,4	30,8	4
1983	20	13,6	8	32,0	38,9	5
1984	20	14,0	7	26,4	38	5
1985	18	10,9	8	26,0	36,2	4
1986	20	14,2	7	32,0	41,6	3
1987	15	14,0	11	25,5	34,4	3
1988	19	14,4	10	41,2	29,9	4
1989	15	12,6	12	30,4	27,2	4
1990	15	16,3	10	30,1	27,2	6
1991	17	15,6	14	35,5	29,9	6
1992	16	18,6	9	28,8	31,7	6
1993	17	14,9	11	28,9	31,7	3
1994	20	15,9	8	29,5	34,4	7
1995	20	14,6	7	40,6	38	6
1996	20	13,1	11	33,4	35,3	6
1997	18	12,1	8	18,4	39,8	4
1998	22	8,7	8	40,0	39,8	7
1999	26	12,8	6	29,6	49,7	10
2000	19	13,5	8	43,1	31,7	7
2001	20	12,6	8	40,0	38,9	6
2002	17	13,5	10	33,9	31,7	4
2003	20	15,5	8	29,1	35,3	6
2004	20	12,7	9	26,8	38,9	7

Tableau D.8 Idem que le tableau D1 mais pour la station de Bogandé

<i>Années</i>	<i>Prcpl</i>	<i>SDII</i>	<i>CDD</i>	<i>Max3d</i>	<i>Prcp90</i>	<i>Pwj>90p</i>
	(%/jour/mois)	(mm/jour)	jour/mois	mm/jour	mm/jour	jour/mois
1961	22	12,0	7	39,0	38,0	7
1962	22	15,0	8	27,0	28,0	8
1963	20	12,0	10	30,0	31,0	7
1964	23	14,0	10	37,0	39,0	7
1965	16	23,0	10	58,0	28,0	6
1966	16	16,0	9	36,0	23,0	5
1967	22	13,0	7	34,0	31,0	8
1968	24	15,0	8	47,0	31,0	7
1969	19	11,0	7	22,0	20,0	8
1970	20	8,0	9	21,0	34,0	7
1971	18	10,0	8	21,0	28,0	6
1972	19	13,0	12	37,0	18,0	7
1973	16	14,0	14	28,0	23,0	6
1974	20	12,0	7	29,0	17,0	6
1975	20	12,0	6	39,0	21,0	6
1976	23	16,0	9	36,0	33,0	7
1977	17	12,0	12	33,0	26,0	6
1978	25	10,0	6	30,0	30,0	7
1979	20	13,0	7	35,0	30,0	6
1980	11	16,2	11	27,0	22,9	5
1981	13	18,0	13	35,0	20,0	4
1982	20	14,0	8	35,0	33,0	7
1983	12	11,0	12	23,0	17,0	4
1984	20	10,0	8	28,1	41	7
1985	18	10,0	11	19,0	28,0	6
1986	17	15,0	8	31,0	26,0	7
1987	18	14,0	10	31,0	28,0	6
1988	21	11,0	7	28,0	37,0	8
1989	15	13,0	10	24,0	21,0	7
1990	19	12,0	7	24,0	30,0	6
1991	20	13,0	12	30,0	30,0	6
1992	20	15,0	9	33,0	30,0	6
1993	15	17,0	11	28,0	37,0	6
1994	20	18,2	9	37,9	40,38	5
1995	23	14,0	8	35,0	28,0	6
1996	18	17,0	13	43,0	37,0	7
1997	20	11,0	7	29,0	28,0	5
1998	24	16,0	7	45,0	29,0	6
1999	24	12,0	8	27,0	34,0	7
2000	15	11,0	12	22,0	32,0	7
2001	22	14,0	8	33,0	24,0	5
2002	16	14,0	12	29,0	35,0	6
2003	20	14,0	8	35,0	22,0	6
2004	19	11,7	10	24,0	36	6

Tableau D.9 Idem que le tableau D1 mais pour la station de Barsalogho

<i>Années</i>	<i>Prcpl</i> (%/jour/mois)	<i>SDII</i> (mm/jour)	<i>CDD</i> jour/mois	<i>Max3d</i> mm/jour	<i>Prcp90</i> mm/jour	<i>Pwj>90p</i> jour/mois
1961	20	16,1	7	39,3	42,9	6
1962	21	12,2	7	34,7	49,2	8
1963	25	14,8	7	39,4	49,2	8
1964	21	15,1	8	43,4	42,9	7
1965	21	13,2	10	33,1	42,0	6
1966	20	14,2	9	30,4	42,9	6
1967	19	12,3	9	27,0	39,3	6
1968	15	12,3	11	33,8	32,1	5
1969	21	13,9	7	43,3	44,7	7
1970	17	12,5	10	24,4	33,9	5
1971	15	11,7	11	23,2	30,3	5
1972	17	19,4	10	37,8	32,1	5
1973	17	14,1	9	31,4	33,0	6
1974	19	11,9	7	26,4	39,3	6
1975	16	13,8	8	31,8	33,9	5
1976	15	14,5	11	31,5	33,0	5
1977	14	15,5	12	26,8	29,4	5
1978	18	13,3	8	26,9	34,8	6
1979	18	10,9	7	19,8	36,6	6
1980	17	9,8	10	24,8	32,1	5
1981	19	10,6	10	22,8	35,7	6
1982	14	10,0	13	23,1	26,7	4
1983	15	10,8	9	22,7	29,4	5
1984	12	14,4	13	28,3	24,0	4
1985	14	9,1	10	18,7	27,6	4
1986	16	11,7	10	26,3	30,3	5
1987	12	14,2	14	22,4	23,1	4
1988	12	16,0	16	50,6	24,0	4
1989	11	13,2	15	22,7	22,2	4
1990	10	18,5	15	26,0	23,0	3
1991	17	28,0	16	40,5	33,0	3
1992	8	12,6	15	21,5	21,3	3
1993	11	15,1	11	31,2	28,5	4
1994	15	20,0	8	61,7	45	6
1995	22	12,2	9	22,3	36,6	6
1996	19	13,0	11	35,9	36,6	6
1997	19	9,8	9	19,0	28,5	5
1998	15	11,5	10	36,5	41,1	6
1999	21	13,8	13	22,8	31,2	5
2000	16	11,8	10	24,8	29,4	5
2001	15	14,3	12	26,0	29,4	4
2002	15	13,2	7	34,4	37,5	6
2003	20	17,0	10	43,1	37,5	6
2004	20	12,9	10	27,7	29,0	4

Tableau D.10 Idem que le tableau D1 mais pour la station de Sebba

<i>Années</i>	<i>Prcpl</i> (%/jour/mois)	<i>SDII</i> (mm/jour)	<i>CDD</i> jour/mois	<i>Max3d</i> mm/jour	<i>Prcp90</i> mm/jour	<i>Pwj>90p</i> jour/mois
1961	14	16,0	7	40,9	27,6	5
1962	25	16,4	5	43,3	48,3	8
1963	17	13,2	8	28,2	32,1	5
1964	20	23,9	6	47,5	37,5	8
1965	19	19,1	7	40,4	36,6	7
1966	18	16,0	9	38,5	34,8	6
1967	21	14,6	11	40,5	41,1	7
1968	17	13,9	12	34,9	33,0	5
1969	19	13,4	14	31,3	35,7	7
1970	17	14,0	13	29,9	33,0	5
1971	14	16,5	13	33,6	27,6	6
1972	15	14,8	14	31,1	28,5	5
1973	18	9,7	9	20,1	33,9	6
1974	18	10,3	11	29,0	34,8	5
1975	20	10,2	11	25,0	37,5	5
1976	21	16,5	13	37,0	37,5	6
1977	14	9,6	8	22,9	27,6	5
1978	16	21,7	13	37,8	30,3	5
1979	16	12,5	13	33,0	30,3	5
1980	12	17,9	9	37,5	24,0	5
1981	15	11,6	11	23,4	29,4	5
1982	15	13,6	14	38,1	28,5	5
1983	11	15,7	12	20,4	21,3	4
1984	13	11,2	12	28,6	27,2	5
1985	16	13,9	12	31,0	30,3	6
1986	19	9,1	13	19,3	35,7	5
1987	16	8,3	9	17,7	31,2	6
1988	20	14,3	12	30,0	38,4	8
1989	14	11,0	13	19,2	26,7	7
1990	17	13,1	12	26,2	33,0	6
1991	24	9,7	16	21,0	46,5	7
1992	17	13,6	15	31,6	33,0	6
1993	16	11,4	13	24,5	31,2	6
1994	23	12,2	10	39,1	41,6	7
1995	19	11,4	13	26,1	35,7	6
1996	17	13,9	12	32,9	33,0	5
1997	14	9,9	10	15,2	27,6	6
1998	20	13,3	13	33,0	38,4	7
1999	21	12,2	10	23,0	41,1	9
2000	16	9,7	14	21,9	31,2	6
2001	20	10,3	12	22,3	39,3	8
2002	13	12,9	14	29,9	25,8	7
2003	15	12,8	12	30,0	28,5	5
2004	15	16,4	10	30,2	29,0	4

Tableau D.11 Idem que le tableau D1 mais pour la station d'Aribinda

<i>Années</i>	<i>Prcpl</i> (%/jour/mois)	<i>SDII</i> (mm/jour)	<i>CDD</i> jour/mois	<i>Max3d</i> mm/jour	<i>Prcp90</i> mm/jour	<i>Pwj>90p</i> jour/mois
1961	20	9,9	13	19,5	34,0	6
1962	25	9,1	10	33,6	43,0	7
1963	24	14,5	12	25,4	37,0	7
1964	20	18,4	12	26,7	36,0	6
1965	15	23,0	14	40,1	26,0	5
1966	14	19,2	14	39,4	26,0	4
1967	15	9,7	17	31,7	31,0	5
1968	17	9,2	12	25,9	20,0	5
1969	19	9,2	13	21,5	27,0	6
1970	16	9,3	16	21,7	26,0	5
1971	16	10,0	16	18,4	15,0	4
1972	11	9,3	17	15,9	19,0	4
1973	16	9,8	14	24,9	23,0	5
1974	17	13,4	12	19,5	34,0	5
1975	17	13,6	15	27,4	27,0	5
1976	18	10,8	12	35,0	33,0	5
1977	14	12,8	16	19,5	27,0	4
1978	15	10,6	16	37,1	25,0	4
1979	15	8,6	14	19,4	30,0	4
1980	13	10,8	16	15,9	28,0	4
1981	16	10,8	16	21,6	33,0	5
1982	16	10,1	12	25,8	27,0	5
1983	11	10,0	18	16,6	24,0	4
1984	13	10,0	11	22,4	27	4
1985	10	10,0	17	22,5	22,0	3
1986	12	6,6	16	17,3	25,0	4
1987	15	17,0	15	15,2	32,0	5
1988	11	10,2	17	25,0	25,0	4
1989	15	14,9	17	21,9	29,0	4
1990	12	15,2	16	21,5	25,0	4
1991	17	10,7	13	37,5	33,0	5
1992	15	16,3	16	18,7	29,0	4
1993	10	16,3	19	22,5	21,0	3
1994	20	16,3	10	55,5	36	6
1995	14	10,1	12	21,2	26,0	4
1996	15	15,2	15	18,3	32,0	5
1997	15	15,8	13	29,4	31,0	5
1998	12	11,1	15	34,9	26,0	4
1999	18	12,0	16	25,2	34,0	5
2000	14	12,0	15	23,3	28,0	4
2001	13	12,0	18	28,1	27,0	4
2002	15	13,0	14	25,0	31,0	6
2003	21	10,0	12	27,8	40,0	3
2004	14	12,4	21	19,4	18,8	4

Tableau D.12 Idem que le tableau D1 mais pour la station de Kollo

<i>Années</i>	<i>Prcpl</i> (%/jour/mois)	<i>SDII</i> (mm/jour)	<i>CDD</i> jour/mois	<i>Max3d</i> mm/jour	<i>Prcp90</i> mm/jour	<i>Pwj>90p</i> jour/mois
1961	21	26,6	11	37,9	40,2	6
1962	19	11,2	7	38,8	35,7	8
1963	14	19,3	8	44,0	26,7	5
1964	22	16,7	10	38,4	42,0	6
1965	20	12,2	10	36,2	39,3	6
1966	18	22,7	9	39,2	34,8	5
1967	20	20,0	10	37,1	38,4	6
1968	17	12,7	10	31,9	33,0	5
1969	20	14,5	10	30,2	37,5	6
1970	19	12,4	15	22,3	36,6	5
1971	21	12,5	11	21,5	40,2	4
1972	12	10,2	9	17,3	23,1	4
1973	15	8,3	13	21,6	29,4	5
1974	15	10,6	10	32,0	28,5	5
1975	13	13,8	7	41,2	25,8	6
1976	16	18,1	8	29,0	30,3	6
1977	20	13,1	13	40,2	38,4	4
1978	21	17,3	9	38,3	41,1	5
1979	15	14,0	9	22,8	29,4	5
1980	17	14,5	9	26,8	32,1	4
1981	14	10,3	12	27,0	26,7	5
1982	21	15,0	11	17,9	40,2	4
1983	12	9,9	9	27,6	23,1	3
1984	13	7,2	8	15,6	30	4
1985	17	7,2	12	20,2	32,1	5
1986	14	13,1	9	25,6	27,6	6
1987	15	16,3	14	24,2	29,4	5
1988	17	10,7	10	27,7	33,0	6
1989	13	16,1	11	42,6	25,8	4
1990	20	14,5	9	31,1	37,5	5
1991	14	13,9	12	30,1	26,7	7
1992	16	11,9	11	26,8	30,3	5
1993	19	15,6	14	19,3	35,7	5
1994	15	14,2	10	52,5	39,8	7
1995	13	14,2	12	32,3	24,9	6
1996	21	17,5	14	35,9	40,2	5
1997	14	15,1	15	29,0	23,2	4
1998	13	12,1	8	49,2	25,8	6
1999	10	11,0	10	29,0	39,2	6
2000	18	13,9	13	25,9	33,9	5
2001	19	12,2	11	23,7	35,7	6
2002	15	12,9	11	37,9	35,3	6

Tableau D.13 Idem que le tableau D1 mais pour la station de Say

<i>Années</i>	<i>Prcpl</i> (%/jour/mois)	<i>SDII</i> (mm/jour)	<i>CDD</i> jour/mois	<i>Max3d</i> mm/jour	<i>Prcp90</i> mm/jour	<i>Pwj>90p</i> jour/mois
1961	16	20,7	9	38,0	30,3	5
1962	19	14,0	6	29,4	36,6	7
1963	16	22,8	9	35,3	31,2	6
1964	14	19,0	11	45,9	27,6	5
1965	18	15,1	10	41,2	33,9	7
1966	18	14,9	7	34,5	34,8	6
1967	13	17,9	13	44,8	24,9	5
1968	18	17,3	9	37,0	33,9	8
1969	18	13,0	9	31,5	34,8	6
1970	13	14,5	11	19,8	24,9	5
1971	12	12,2	15	22,1	24,0	6
1972	12	14,0	13	28,0	24,0	0
1973	16	10,4	12	24,5	30,3	6
1974	19	11,9	8	30,4	35,7	7
1975	17	15,7	10	25,6	32,1	9
1976	17	19,7	9	39,1	32,1	6
1977	15	19,2	13	42,2	30,0	7
1978	20	19,4	9	47,9	38,4	8
1979	20	11,7	8	30,1	38,4	7
1980	19	10,5	9	25,8	35,7	7
1981	15	17,1	11	22,7	28,5	5
1982	16	8,4	12	21,0	31,2	6
1983	14	16,7	9	31,2	27,6	5
1984	15	8,4	10	23,8	29,0	5
1985	14	15,3	12	20,9	30,0	6
1986	16	15,0	9	32,7	31,2	6
1987	15	13,1	13	25,6	28,5	6
1988	21	14,9	9	36,2	41,1	8
1989	18	12,4	12	27,4	33,9	7
1990	14	15,6	8	27,6	27,6	5
1991	17	17,4	11	38,7	32,1	6
1992	17	11,9	11	28,9	32,1	6
1993	14	14,3	12	26,8	26,7	7
1994	20	17,4	10	57,3	37	7
1995	15	13,4	9	22,3	28,5	6
1996	14	10,5	12	27,5	27,6	6
1997	14	12,0	10	22,9	27,6	5
1998	20	13,4	6	40,2	38,4	7
1999	21	13,9	9	35,1	40,2	7
2000	16	13,0	10	30,3	30,3	7
2001	15	13,0	9	28,7	29,4	6
2002	19	13,9	10	40,3	39,48	7

Tableau D.14 Idem que le tableau D1 mais pour la station de Téra

<i>Années</i>	<i>Prcpl</i> (%/jour/mois)	<i>SDII</i> (mm/jour)	<i>CDD</i> jour/mois	<i>Max3d</i> mm/jour	<i>Prcp90</i> mm/jour	<i>Pwj>90p</i> jour/mois
1961	18	18,2	9	37,3	36,2	5
1962	14	12,9	12	22,4	28,1	4
1963	16	13,9	9	29,3	30,8	5
1964	22	12,3	7	30,8	42,5	7
1965	24	8,7	7	21,6	45,2	7
1966	14	12,5	11	27,7	28,1	4
1967	20	11,2	8	25,5	38,9	6
1968	17	12,7	14	24,1	32,6	5
1969	14	12,1	13	25,5	27,2	4
1970	12	11,7	13	24,0	25,4	4
1971	11	10,6	10	22,1	24,5	3
1972	12	13,2	14	23,7	22,7	4
1973	15	10,9	11	28,1	29,9	4
1974	12	8,5	10	18,9	25,4	4
1975	16	9,2	9	22,4	31,7	5
1976	18	9,9	7	26,1	29,9	5
1977	14	12,5	10	24,9	29,0	4
1978	12	18,8	13	29,7	23,9	4
1979	16	13,9	9	32,1	32,6	5
1980	11	12,2	13	21,6	23,6	3
1981	13	14,0	15	24,2	26,3	4
1982	10	7,5	20	11,3	18,5	3
1983	10	10,6	15	15,5	20,3	3
1984	13	7,2	12	17,2	24,9	4
1985	10	17,4	15	17,8	21,2	3
1986	12	10,0	11	20,2	25,4	4
1987	11	10,8	12	19,1	24,5	3
1988	17	15,4	11	24,8	32,0	5
1989	14	11,0	12	17,5	29,0	4
1990	14	10,0	10	22,5	29,9	4
1991	13	16,4	15	34,9	25,4	4
1992	14	13,8	12	26,7	29,0	4
1993	13	9,2	13	14,1	27,5	4
1994	17	11,0	9	32,0	33,0	5
1995	13	14,8	12	21,8	28,1	4
1996	14	13,3	15	26,6	26,3	4
1997	10	9,8	17	19,5	20,0	3
1998	18	9,5	9	23,7	36,2	5
1999	20	8,8	8	21,3	41,6	6
2000	12	12,0	13	17,5	23,9	4
2001	14	16,6	12	34,0	29,0	4
2002	18	11,6	11	23,4	33,9	5

Tableau D.15 Idem que le tableau D1 mais pour la station de Dakiri

<i>Années</i>	<i>Prcpl</i> (%/jour/mois)	<i>SDII</i> (mm/jour)	<i>CDD</i> jour/mois	<i>Max3d</i> mm/jour	<i>Prcp90</i> mm/jour	<i>Pwj>90p</i> jour/mois
1962	28	13,2	5	34,2	48,2	10
1963	26	14,9	8	42,2	39,2	9
1964	24	17,0	6	56,3	38,3	8
1965	21	12,3	8	40,9	36,5	7
1966	20	15,5	8	39,5	34,7	7
1967	22	10,4	7	29,8	37,4	8
1968	18	12,1	10	35,3	26,6	6
1969	20	14,8	8	39,8	37,4	7
1970	17	14,9	11	21,5	32,9	6
1971	14	11,3	12	19,3	26,6	6
1972	11	17,7	15	22,0	21,2	5
1973	21	11,9	7	29,0	35,6	9
1974	23	11,2	7	28,6	39,2	7
1975	17	10,8	9	23,2	31,1	5
1976	29	12,1	7	20,4	46,4	10
1977	14	11,6	11	22,0	25,7	6
1978	20	12,9	11	29,9	32,9	7
1979	16	14,4	11	38,4	29,3	6
1980	15	14,7	11	42,3	25,7	5
1981	12	20,4	14	31,1	23,0	4
1982	18	16,9	8	39,1	29,3	6
1983	10	14,5	13	24,6	19,4	3
1984	11	16,2	13	21,4	22,1	4
1985	13	19,7	13	26,8	26,6	7
1986	14	11,0	8	21,7	24,8	5
1987	13	17,6	13	30,5	27,5	7
1988	16	14,7	9	28,0	30,2	6
1989	13	12,5	15	21,9	22,1	4
1990	11	12,8	11	23,8	19,4	3
1991	18	14,7	12	29,9	28,4	6
1992	12	12,6	12	23,2	23,0	6
1993	13	14,5	14	22,2	24,8	6
1994	24	11,5	7	35,1	38,3	7
1995	16	10,4	11	25,0	25,7	6
1996	14	16,4	12	36,6	23,0	5
1997	14	16,3	10	31,0	25,7	5
1998	21	13,6	9	34,8	32,9	7
1999	17	11,0	12	19,2	31,1	7
2000	13	12,9	14	18,6	23,9	6
2001	13	16,1	11	29,6	25,7	5
2002	13	22,6	13	34,3	23,9	6
2003	19	20,9	9	52,1	32,9	7
2004	12	14,6	14	24,6	23,9	5

Tableau D.16 Idem que le tableau D1 mais pour la station de Dori

<i>Années</i>	<i>Prcpl</i> (%/jour/mois)	<i>SDII</i> (mm/jour)	<i>CDD</i> jour/mois	<i>Max3d</i> mm/jour	<i>Prcp90</i> mm/jour	<i>Pwj>90p</i> jour/mois
1961	23	10,4	7	32,8	44,3	6
1962	22	8,1	6	22,8	40,7	6
1963	22	12,5	7	46,2	41,6	6
1964	22	11,5	8	31,1	42,5	6
1965	22	9,3	11	33,2	39,8	6
1966	19	17,0	8	36,0	37,1	5
1967	16	8,8	10	24,9	31,7	4
1968	16	10,7	12	27,4	29	4
1969	20	13,3	10	41,2	36,2	5
1970	16	11,6	11	19,1	31,7	4
1971	13	9,4	13	21,7	28,1	4
1972	15	9,5	11	24,3	28,1	4
1973	14	14,0	10	18,0	29	4
1974	15	9,7	10	30,5	29,9	4
1975	16	15,5	9	21,1	33,5	4
1976	19	9,9	8	33,3	32,6	5
1977	16	12,0	10	20,1	32,6	4
1978	17	14,7	8	33,6	31,7	5
1979	14	12,8	14	21,8	28,1	4
1980	13	10,7	16	31,2	27,2	4
1981	16	13,6	12	21,0	31,7	4
1982	13	10,6	10	27,8	24,5	4
1983	12	12,9	12	21,5	25,4	4
1984	11	12,8	13	24,8	23,6	3
1985	15	12,9	10	26,0	31,7	4
1986	12	13,6	14	24,6	26,3	4
1987	9	15,0	15	18,4	20	3
1988	17	11,1	11	25,8	32,6	5
1989	16	14,6	14	22,5	29,9	4
1990	16	13,9	10	27,9	32,6	4
1991	16	13,9	10	26,0	30,8	4
1992	15	9,8	13	25,3	29	4
1993	12	10,9	15	22,2	22,7	3
1994	20	8,1	8	41,1	34,4	5
1995	19	9,2	9	23,9	36,2	5
1996	13	13,3	11	23,4	25,4	4
1997	16	12,3	10	26,6	31,7	4
1998	17	9,8	8	27,0	34,4	5
1999	19	11,2	9	20,7	38	5
2000	15	11,8	11	23,1	31,7	4
2001	15	11,6	13	24,7	29,9	4
2002	16	11,6	14	26,3	28,1	4
2003	24	11,2	8	37,9	42,5	6
2004	16	11,1	12	19,4	31,7	4

Tableau D.17 Idem que le tableau D1 mais pour la station de Tougouri

<i>Année</i>	<i>Prcpl</i>	<i>SDII</i>	<i>CDD</i>	<i>Max3d</i>	<i>Prcp90</i>	<i>Pwj>90p</i>
	(%/jour/mois)	(mm/jour)	jour/mois	mm/jour	mm/jour	jour/mois
1961	19	14	12	29	26	6
1962	16	11	9	33	35	7
1963	24	11	8	32	41	8
1964	26	9	8	31	36	8
1965	20	94	10	68	40	7
1966	12	4	10	15	23	4
1967	23	13	8	38	45	8
1968	19	16	12	40	34	6
1969	22	11	10	19	34	6
1970	17	18	12	36	42	6
1971	18	12	8	27	36	6
1972	16	14	12	22	29	8
1973	18	17	9	38	34	5
1974	21	15	8	40	42	7
1975	18	11	12	28	34	6
1976	20	17	11	35	34	8
1977	19	14	12	28	34	8
1981	14	19	17	24	25	8
1982	15	9	15	20	25	4
1983	12	15	16	24	20	6
1984	17	11	17	19	28	8
1985	17	14	15	28	29	9
1986	11	15	19	16	18	6
1987	13	12	18	16	21	7
1988	19	13	13	29	32	8
1989	14	17	17	29	25	6
1990	13	14	15	21	25	5
1991	14	13	16	27	25	5
1992	15	11	11	27	25	6
1993	14	13	10	21	25	5
1994	20	14	10	23	24	7
1995	17	20	8	43	30	7
1996	13	16	9	27	28	6
1997	14	16	11	41	26	6
1998	21	25	8	25	27	6
1999	19	43	6	43	25	9
2000	16	12	13	24	27	10
2001	16	11	16	26	33	5
2002	15	12	10	30	27	5
2003	21	19	16	46	27	5
2004	16	19	11	46	38	7

ANNEXE E DONNÉES HYDROLOGIQUES

Tableau E.1 Précipitation moyenne mensuelle pondérée (en mm/an) sur le bassin de la Sirba sur la période 1962-1990

Années	Dori	Aribinda	Tougouri	Bogandé	Sebba	Boulsa	Gihèye	Fada	Kaya	Koupela	Barsalogho	Djiba	Moy/an
1963	34,8	40,2	80,4	84,5	131,0	48,2	20,8	48,8	7,3	50,2	65,3	7,2	618,7
1964	34,2	37,9	97,3	118,4	22,1	92,5	35,0	47,7	9,9	45,7	83,3	9,1	633,1
1965	23,7	56,5	119,0	129,9	194,9	74,9	35,5	34,7	8,3	50,2	74,6	7,5	809,7
1966	35,8	38,6	57,4	87,6	167,9	54,5	22,5	41,4	7,5	48,5	53,8	4,6	620,1
1967	23,5	30,9	96,6	103,3	189,0	64,2	35,3	39,0	6,8	44,0	62,8	5,7	701,1
1968	17,9	29,0	81,8	120,6	136,5	69,9	23,1	44,4	5,2	48,6	65,3	5,0	647,3
1969	33,0	26,5	85,8	98,5	172,1	53,8	21,6	41,1	6,5	41,2	59,3	5,8	645,2
1970	18,7	29,4	60,1	66,0	141,7	44,7	22,7	33,0	4,8	32,8	52,0	4,8	510,7
1971	23,0	25,0	77,8	70,1	142,3	40,8	17,1	33,3	6,9	45,7	64,8	2,9	549,7
1972	17,1	20,0	72,2	103,7	119,4	50,0	17,4	37,8	5,8	30,8	47,2	4,0	525,4
1973	24,9	24,2	76,1	82,3	98,8	57,6	19,9	32,8	7,6	41,5	42,2	4,8	512,7
1974	16,8	27,9	97,0	96,6	139,2	61,1	20,5	36,6	7,9	48,4	61,9	5,5	619,4
1975	27,0	35,1	71,0	102,7	113,5	46,0	24,9	44,8	8,6	45,5	61,6	4,4	585,1
1976	18,5	24,2	92,9	104,7	167,2	73,9	29,3	43,9	9,4	51,7	59,8	4,4	679,9
1977	27,0	27,9	78,4	91,1	189,6	50,6	25,2	43,3	6,1	39,6	61,3	4,3	644,4
1978	20,9	35,2	73,6	93,7	161,1	49,0	25,7	35,3	5,4	37,5	64,5	5,8	607,7
1979	14,7	34,5	68,6	106,5	118,4	59,7	24,3	40,9	4,6	48,9	71,3	5,3	597,7
1980	17,8	23,8	69,5	56,2	153,1	50,5	22,2	33,7	6,2	35,3	64,0	5,0	537,3
1981	23,6	33,4	76,3	74,8	108,4	61,3	16,1	35,3	6,1	37,1	62,7	5,0	540,1
1982	17,6	25,4	51,6	92,5	151,3	48,8	17,8	35,5	5,8	31,6	62,5	3,3	543,7
1983	15,0	19,7	53,3	62,4	76,9	47,8	14,6	30,1	6,6	34,9	43,6	4,1	409,0
1984	23,2	27,6	54,8	82,3	104,8	47,1	18,3	29,1	4,5	28,8	48,3	2,5	471,3
1985	16,4	27,7	65,2	75,5	147,7	38,9	19,8	34,4	5,9	29,2	58,6	2,3	521,6
1986	12,5	18,8	50,6	98,7	122,5	50,4	13,1	27,6	5,7	42,7	56,2	3,3	502,1
1987	29,5	23,7	40,6	97,8	88,4	57,7	12,3	29,1	7,9	40,1	41,8	3,3	472,2
1988	23,2	25,2	88,0	96,1	163,9	61,0	19,7	32,6	6,0	42,7	58,4	2,3	619,1
1989	22,9	17,0	77,2	98,2	88,4	54,2	22,7	41,0	6,2	48,3	69,7	3,8	549,6

1990	26,0	18,7	62,6	85,8	119,5	45,0	14,7	25,6	8,4	36,4	48,1	2,6	493,4
Moy.	23,0	29,0	74,5	93,2	135,9	56,3	21,8	37,3	6,7	41,7	60,2	4,6	584,2

Tableau E.2 Débits moyens mensuels de la Sirba à Garbé-Kourou (exutoire sur le fleuve Niger, cf. figure 2.2) sur pour chaque année durant la période 1963-1990.

<i>Année</i>	<i>Jan</i>	<i>Fév.</i>	<i>Mars</i>	<i>Avr.</i>	<i>Mai</i>	<i>Juin</i>	<i>Juil.</i>	<i>Août</i>	<i>Sept</i>	<i>Oct.</i>	<i>Nov.</i>	<i>Déc.</i>	<i>Moy(m³/s)</i>
1963	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	7,1	15,9	35,9	19,5	2,0	0,0	6,7
1964	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	11,9	65,0	211,0	122	12,3	0,7	35,3
1965	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	17,0	54,7	274,0	136	11,7	1,2	41,2
1966	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,7	11,4	14,0	24,8	30,4	6,9	0,1	8,0
1967	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	23,7	127,0	281,0	92,3	10,1	1,3	44,8
1968	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0	7,9	11,5	13,3	2,7	0,0	3,3
1969	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	8,2	39,5	115,0	58,3	7,4	0,2	19,1
1970	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	1,2	15,2	30,0	57,9	28,7	5,6	0,0	11,6
1971	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,1	13,5	48,8	67,1	39,8	4,6	0,4	14,8
1972	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,5	21,5	26,1	15,6	1,2	0,0	6,1
1973	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,1	36,2	136,0	75,6	15,2	1,5	0,0	22,5
1974	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	99,1	132,0	132,0	22,5	3,4	0,2	32,4
1975	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	1,9	43,4	151,0	111,0	29,3	3,1	0,1	28,3
1976	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	5,7	12,4	2,9	73,8	24,6	8,0	2,0	10,8
1977	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	26,3	44,7	81,6	27,4	1,5	0,0	15,1
1978	0,0	0,0	0,0	0,0	4,3	8,1	30,6	48,4	47,5	13,7	0,7	0,0	12,8
1979	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	17,7	25,5	105,0	65,4	5,9	0,3	18,5
1980	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	114,0	83,5	80,3	21,5	1,5	0,0	25,1
1981	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	32,7	65,3	62,8	41,6	2,8	0,0	17,1
1982	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,3	33,2	104,0	91,0	15,4	0,9	0,0	20,6
1983	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	16,8	37,4	42,3	66,0	16,9	1,6	0,0	15,1
1984	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	9,9	6,1	65,6	96,8	74,8	10,6	0,1	22,1
1985	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	201,0	193,0	30,9	0,6	0,0	35,5
1986	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1	51,8	145,0	77,2	13,1	0,8	0,0	24,2
1987	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,5	31,9	87,0	44,5	32,6	2,1	0,1	16,6
1988	0,0	0,0	0,0	0,0	8,6	11,9	115,0	281,0	310,0	46,8	3,9	0,4	64,8
1989	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	42,5	163,0	174,0	10,8	0,4	0,0	32,6
1990	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14,8	18,5	60,6	64,8	5,8	0,0	0,0	13,7
Moyenne	0,5	3,4	32,7	84,4	112,5	41,2	4,6	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	22,1

Tableau E.3 Inventaire des retenues d'eau du bassin

<i>Provinces</i>	<i>Retenue</i>	<i>Longitude</i>	<i>Latitude</i>	<i>Nom</i>	<i>Surface</i>	<i>Année</i>	<i>Capacité</i>
Ganzourgou	Digre	-0,569	12,277	Sirba	10	1986	40
	Souka	-0,517	12,270	Sirba	10	1986	40
	Kare	-0,596	12,381	Sirba	0	1983	100
Gangna	Boudry	-0,664	12,497	Sirba	0	1948	5
	Piela	-0,144	12,720	Sirba	20	1974	200
	Kouri	-0,061	12,647	Sirba	26	1966	432
	Dabesma	-0,175	12,692	Sirba	120	1958	1000
	Kongaye 2			Sirba	30	1975	310
	Bilanga	-0,028	12,548	Sirba	65	1966	1060
	Boussikomi	-0,224	12,730	Sirba	0	1974	300
	Bilanga yanga 2	-0,078	12,458	Sirba	70	0	1106
	Bilanga yanga 1	-0,097	12,460	Sirba	70	1966	1106
	Sirba			Sirba	1700	0	30230
	Bogande	-0,129	12,979	Faga	180	1966	1994
	Kossougoudou	-0,233	12,934	Faga	96	1961	1250
	Kogssabologo	-0,233	12,953	Faga	0	1988	90
	Kongaye	-0,140	12,789	Faga	0	1950	200
	Boulyoguin	-0,013	12,917	Faga	62	1986	940
	Samou	0,141	13,010	Faga	200	1992	5000
	Dakiri			Faga	763	1960	10500
	Manni	-0,213	13,257	Faga	150	1952	1200
	Thion	-0,183	13,129	Faga	0	1957	200
	Bahniaga	-0,107	13,129	Faga	0	1974	150
Gourma	Koulfo	0,009	13,234	Faga	25	1973	150
	Samboendi	0,093	13,336	Faga	95	1962	875
	Liptougou	0,300	13,185	Faga	676	1962	7423
	Tibga	0,065	12,175	Sirba	6	1949	60
Kouritenga	Tanga	-0,389	12,413	Sirba	25	1987	192
	Kougouri	-0,424	12,312	Sirba	0	1985	30
	Niounguin	-0,145	12,272	Sirba	0	1986	45
	Dapelogo			Sirba	0	1987	300
	Kabega	-0,104	12,116	Sirba	0	1976	100
Namentenga	Baskoure 1	-0,237	12,174	Sirba	17	1978	200
	Baskoure 2	-0,237	12,174	Sirba	0	1983	100
	Boulsa	0,569	12,686	Sirba	10	1955	10
	Dargo	-0,288	12,719	Sirba	59	1966	844
	Falanguin	-0,256	12,666	Sirba	6	1986	50
	Korossaboloro	-0,248	12,685	Sirba	12	1987	90
	Falguin			Sirba	9	1994	71
	Zeguedegen	-0,465	12,978	Faga	493	1952	2415
	Bouroum	-0,630	13,647	Faga	51	1952	600
	Yalgo	-0,269	13,580	Faga	1500	1954	10000
	Tougouri	-0,532	13,317	Faga	600	1950	6000

<i>Sanmatenga</i>	<i>Dablo</i>	<i>1,179</i>	<i>13,722</i>	<i>Faga</i>	<i>555</i>	<i>1977</i>	<i>6000</i>
	Pensa	-0,814	13,655	Faga	100	1950	1000
	Dibilou	-0,948	13,360	Faga	0	1964	400
	Kiemna	-0,863	13,318	Faga	0	1950	2000
	Issaogo	-0,723	13,025	Faga	0	1983	60
	Koualema	-0,919	13,165	Faga	3	1974	8
	Pissila I	-0,793	13,177	Faga	6	1971	20
	Solomnore	-0,799	13,218	Faga	0	1975	900
Séno	Higa			Faga	500,000	0	6000
	Nyapse			Faga	122,000	1980	1423
	Boukouma			Faga	265,000	1985	2460
	Serkissouma			Faga	90,000		520

ANNEXE F

INDICES NORMALISÉS DE VÉGÉTATION POUR LA PÉRIODE

1990-1999

<i>Années</i>	<i>Jan</i>	<i>Fév.</i>	<i>Mars</i>	<i>Avril</i>	<i>Mai</i>	<i>Juin</i>	<i>Juil</i>	<i>Août</i>	<i>Sep</i>	<i>Oc</i>	<i>Nov.</i>	<i>Déc.</i>
1990	0,014	0,019	0,008	0,039	0,001	0,09	0,103	0,17	0,4	0,007	0,024	0,08
1991	0,04	0,04	0,07	0,055	0,064	0,09	0,13	0,13	0,12	0,05	0,01	0,06
1992	0,09	0,03	0,04	0,08	0,104	0,12	0,12	0,16	0,15	0,10	0,01	0,032
1993	0,032	0,18	0,56	0,05	0,103	0,09	0,113	0,13	0,09	0,12	0,06	0,007
1994	0,052	0,06	0,05	0,05	0,11	0,10	0,157	0,22	0,88	0,21	0,08	0,052
1995	0,024	0,05	0,02	0,04	0,08	0,121	0,134	0,17	0,05	0,05	0,05	0,024
1997	0,003	0,02	0,04	0,05	0,069	0,06	0,14	0,19	0,18	0,07	0,05	0,023
1998	0,049	0,03	0,02	0,03	0,065	0,104	0,06	0,17	0,02	0,07	0,07	0,820
1999	0,045	0,03	0,05	0,03	0,05	0,05	1,07	0,17	0,10	0,08	0,07	0,036

ANNEXE G

UNITÉ DE BÉTAIL PAR HECTARE (1970-2004)

<i>Année</i>	<i>Gazourgou</i>	<i>Gnagna</i>	<i>Gourma</i>	<i>Kouri tenga</i>	<i>Namen tenga</i>	<i>Sanmen tenga</i>	<i>Séno</i>	<i>Soum</i>	<i>KOLLO</i>	<i>Say</i>	<i>Téra</i>
1970	30	17	6	19	12	7	13	6	12	8	5
1971	30	17	6	19	12	7	13	6	11	8	5
1972	31	17	6	19	12	7	13	6	11	8	5
1973	31	17	6	20	12	8	13	6	11	8	5
1974	23	13	5	14	9	6	10	4	11	8	4
1975	24	13	5	15	9	6	10	5	10	7	4
1976	24	13	5	15	10	6	10	5	11	8	4
1977	25	14	5	16	10	6	11	5	11	8	5
1978	25	14	5	16	10	6	11	5	11	8	5
1979	26	14	5	16	10	6	11	5	11	8	5
1980	32	18	6	20	13	8	14	6	12	8	5
1981	32	18	7	20	13	8	14	6	12	9	5
1982	33	18	7	21	13	8	14	6	12	9	5
1983	33	18	7	21	13	8	14	6	13	9	5
1984	34	19	7	21	13	8	14	6	13	9	5
1985	34	19	7	22	14	8	15	7	13	9	6
1986	35	19	7	22	14	8	15	7	13	10	6
1987	35	20	7	22	14	9	15	7	14	10	6
1988	36	20	7	23	14	9	15	7	14	10	6
1989	37	20	7	23	15	9	16	7	14	10	6
1990	37	21	8	23	15	9	16	7	15	10	6
1991	38	21	8	24	15	9	16	7	15	11	6
1992	39	21	8	24	15	9	16	7	15	11	6
1993	40	22	8	25	16	10	17	8	16	11	7
1994	40	22	8	25	16	10	17	8	16	11	7
1995	41	23	8	26	16	10	17	8	16	12	7
1996	42	23	9	26	17	10	18	8	16	12	7
1997	43	24	9	27	17	10	18	8	17	12	7
1998	44	24	9	27	17	11	19	8	17	12	7
1999	45	25	9	28	18	11	19	9	17	12	7
2000	45	25	9	29	18	11	19	9	18	13	7
2001	46	26	9	29	18	11	20	9	18	13	8
2002	47	26	10	30	19	11	20	9	19	13	8
2003	48	27	10	30	19	12	20	9	19	13	8
2004	49	27	10	31	20	12		9	19	14	8

ANNEXE H

STATISTIQUES AGRICOLES

Tableau H.1 Superficie par hectare par Habitant rendement par hectare production par habitant sur la période 1984-2004 (source: direction des statistiques agricoles 2005, burkina faso) Provinces de Ganzourgou et Gnagna; Gourma et Kouritenga.

Années	Ganzourgou			Gnagna		
	Superficie Hbt (ha)	Rendement/ Ha (Kg)	Production /hbt (Kg)	Superficie/ hbt (ha)	Rendement/ Ha (Kg)	Production/hbt (Kg)
1984	0,3	383	131	0,1	1 480	50
1985	0,3	540	203	0,4	1 107	336
1986	0,3	852	228	0,4	861	340
1987	0,3	894	227	0,3	1 219	212
1988	0,3	932	296	0,3	1 151	254
1989	0,4	914	279	0,1	991	216
1990	0,3	827	226	0,3	546	103
1991	0,3	978	285	0,3	534	205
1992	0,4	1 129	302	0,4	898	263
1993	0,2	1 149	285	0,5	1 366	401
1994	0,2	998	130	0,3	1 268	248
1995	0,3	728	246	0,4	964	408
1996	0,3	1 152	222	0,3	1 678	316
1997	0,3	493	163	0,4	920	258
1998	0,3	1 408	330	0,4	1 737	419
1999	0,3	1 505	274	0,3	1 342	313
2000	0,2	800	124	0,4	196	128
2001	0,3	1 180	186	0,4	856	320
2002	0,2	1 095	228	0,3	1 098	411
2003	0,2	826	160	0,4	1 074	451
2004	0,2	1 208	191			
Gourma				Kouritenga		
1984	0,3	865	207	0,2	705	118
1985	0,4	833	317	0,2	750	140
1986	0,6	836	397	0,2	713	131
1987	0,6	1 354	504	0,2	733	111
1988	0,5	924	411	0,2	779	133
1989	0,5	962	419	0,2	804	170
1990	0,5	913	374	0,1	740	168
1991	0,6	973	502	0,2	772	225
1992	0,6	813	517	0,3	931	263
1993	0,4	1 138	416	0,2	911	234
1994	0,5	1 201	426	0,2	862	147
1995	0,4	989	400	0,3	971	350
1996	0,5	1 185	472	0,2	1 153	199
1997	0,5	1 051	430	0,3	395	115
1998	0,5	1 327	570	0,3	1 203	230
1999	0,5	1 391	527	0,2	1 123	228
2000	0,5	940	435	0,2	662	157
2001	0,4	1 053	283	0,2	1 096	240
2002	0,4	1 012	322	0,2	1 730	219
2003	0,3	1 177	309	0,2	1 170	174
2004	0,3	898	255	0,2	1 190	269

Tableau H.2 Provinces de Namentenga, Sanmatenga, Seno et Soum

Années	Namentenga			Sanmatenga		
	Superficie/hbt (ha)	Rendement Ha (Kg)	Production/hbt (Kg)	Superficie/hbt (ha)	Rendement/ ha (Kg)	Production/hbt (Kg)
1984	0,2	429	69	0,5	374,9	188
1985	0,2	659	120	0,5	420,1	197
1986	0,2	502	138	0,5	644,7	188
1987	0,2	341	107	0,4	318,1	120
1988	0,2	714	341	0,4	716,5	269
1989	0,2	560	183	0,3	488,4	167
1990	0,1	773	207	0,4	313,7	117
1991	0,2	820	252	0,2	573,1	139
1992	0,3	1 032	323	0,2	973,0	169
1993	0,2	963	283	0,2	1194,5	222
1994	0,2	947	203	0,3	799,9	226
1995	0,3	946	219	0,3	621,8	212
1996	0,2	898	261	0,3	594,2	153
1997	0,3	318	141	0,2	367,7	88
1998	0,3	1 142	330	0,2	857,6	205
1999	0,2	934	236	0,3	654,4	173
2000	0,2	553	110	0,2	455,6	111
2001	0,2	592	239	0,2	950,6	190
2002	0,2	1 010	274	0,2	808,7	181
2003	0,2	955	384	0,3	1217,3	334
2004	0,2	1 156	361	0,3	603,2	191
	Seno			Soum		
1984	0,7	449,3	277	0,4	156,3	65
1985	0,5	492,8	283	0,5	141,9	68
1986	0,6	325,6	189	0,4	316,4	117
1987	0,6	420,9	233	0,5	301,2	155
1988	0,7	538,4	355	0,1	1870,6	179
1989	0,8	480,9	397	0,4	307,8	115
1990	0,6	475,2	297	0,3	328,4	113
1991	0,7	736,7	492	0,4	754,7	325
1992	0,6	900,2	547	0,4	741,9	305
1993	0,5	697,3	356	0,4	508,7	220
1994	0,7	731,0	518	0,5	583,1	289
1995	0,5	570,4	290	0,3	367,6	129
1996	0,4	568,2	213	0,4	406,5	164
1997	0,4	418,6	163	0,4	340,6	135
1998	0,4	880,7	330	0,4	637,6	269
1999	0,3	726,0	227	0,4	443,6	159
2000	0,3	458,8	126	0,3	374,3	128
2001	0,2	730,9	135	0,5	622,7	322
2002	0,3	603,4	197	0,5	321,1	150
2003	0,3	926,7	290	0,5	611,9	282
2004	0,4	310,4	124	0,4	264,2	107

Tableau H.3 Provinces de Kollo et Say

<i>Années</i>	<i>Kollo</i>			<i>Say</i>		
	Superficie/ Hbt (ha)	Rendement/ Ha (Kg)	Production /hbt (Kg)	Superficie/ hbt (ha)	Rendement/ Ha (Kg)	Production/hbt (Kg)
1984	0,8	378	404	0,2	278	225
1985	0,9	496	515	0,3	501	334
1986	0,7	403	342	0,3	563	433
1987	0,5	541	282	0,3	456	336
1988	0,8	576	447	0,3	509	361
1989	0,7	353	302	0,8	489	332
1990	0,6	284	223	0,5	382	194
1991	0,5	716	933	0,7	544	382
1992	0,7	276	236	0,7	636	446
1993	0,6	593	367	1,4	662	766
1994	0,6	311	306	0,6	672	348
1995	0,6	267	221	0,7	560	395
1996	0,6	433	283	0,6	572	319
1997	0,6	376	133	0,6	421	205
1998	0,7	388	463	0,9	622	525
1999	0,1	380	330	1,0	618	556
2000	0,6	417	172	1,0	441	376
2001	0,5	489	302	1,0	528	457
2002	0,6	529	320	1,0	597	549
2003	0,5	479	412	0,9	639	499
2004	0,5	576	398	1,0	587	547

ANNEXE I

INDICATEURS DE VULNÉRABILITÉ

Tableau I.1 Indicateurs climatiques par province pour les 1984, 1994 et 2004 : Pourcentage de jours humides *Prcpl*, Précipitation totale (*PrcTOT*), Maximum de jours consécutifs secs (*CDD*), Maximum de précipitation en trois jours consécutifs (*Max3d*), Intensité de précipitation (*SDII*), 90^e centile de précipitation (*Rank90*), Nombre de jour de pluie supérieure au 90^e centile (*Pwj>90*).

<i>Années</i>		<i>Prcpl</i>	<i>SDII</i>	<i>CDD</i>	<i>Max3d</i>	<i>Prcp90</i>	<i>Pwj>90p</i>	<i>PrcpTOT</i>
		%	mm/j	jour	mm	mm/jour	%	mm/mois
1984	Ganzourgou	17	13	7	26	37	7	66
	Gnagna	20	10,0	8	28,1	41	7	86,1
	Gourma	20	13,6	9,0	33,2	33,5	7	77,6
	Kouitnga	20	11,3	8	27,7	36,2	6	65,4
	Namntenga	21	11,4	8	31,6	37,1	6	76,6
	Sanmatenga	12	14,4	13	28,3	24,0	4	66,5
	Seno	13	11,2	12	28,6	27,2	5	60,5
	Soum	13	10,0	11	22,4	27	4	56,6
	Kollo	13	7,2	8	15,6	30	4	41,6
	Say	15	8,4	10	23,8	29,0	5	44,1
	Téra	13	7,2	12	17,2	24,9	4	31,7
1994	Ganzourgou	21	14	10	38	36	7	78
	Gnagna	20	18,2	9	37,9	40,38	5	133,8
	Gourma	27	16,2	9	48	41,6	8	132,5
	Kouitnga	30	17,7	11	44	48	9	159,0
	Namntenga	28	14,1	8,3	33,3	42,8	8	133,8
	Sanmatenga	15	20,0	8	61,7	45	6	132,3
	Seno	23	12,2	10	39,1	41,6	7	101,7
	Soum	20	16,3	10	55,5	36	6	105,0
	Kollo	15	14,2	10	52,5	39,8	7	102,0
	Say	20	17,4	10	57,3	37	7	129,9
	Téra	17	11,0	9	32,0	33,0	5	79,9
2004	Ganzourgou	25	13,6	6	36,9	40	8	113,5
	Gnagna	19	11,7	10	24,0	36	6	91,0
	Gourma	26	13,8	7,2	39,2	46,1	10	126,7
	Kouitnga	24	17,7	11	44	43	7	125,7
	Namntenga	20	9,7	9	21,8	36	7	64,1
	Sanmatenga	20	12,9	10	27,7	29,0	4	66,2
	Seno	15	16,4	10	30,2	29,0	4	84,6
	Soum	14	12,4	21	19,4	18,8	4	31,3
	Kollo	15	12,9	11	37,9	35,3	6	90,7
	Say	19	13,9	10	40,3	39,48	7	102,5

Téra	18	11,6	11	23,4	33,9	5	67,6
------	----	------	----	------	------	---	------

Tableau I.2 Indicateurs environnementaux par province pour les 1984, 1994 et 2004 : Indice de végétation (NDVI), Quantité d'eau par hectare (EAU_HECT), Taux d'occupation des cultures par hectare (PRES_AG), Superficie des cultures pluviales (SUP_PL) Taux d'occupation par unité de bétail à l'hectare (PRES_CHEPT), Qualité de l'eau (QUAL_EAU).

Années	Provinces	NDVI	EAU_HECT	PRES_AG	PRES_CH	SUP_PL	QUAL_EAU
1984	Ganzourgou	0,092	3,5	5,1	49,0	52199	4
	Gnagna	0,064	4232,4	3,2	26,0	15527	5
	Gourma	0,086	1,1	4,8	9,3	54640	5
	Kouritenga	0,086	255,6	5,1	34,6	37832	5
	Namentenga	0,097	530,8	5,1	19,9	37832	1
	Sanmatenga	0,078	72,5	2	27,00	95010	5
	Seno	0,053	39,5	2,6	10,00	75363	5
	Soum	0,043	58,0	2,2	20,00	179233	5
	Kollo	0,051	0,2	0,9	17,5	158001	2
	Say	0,038	0,3	1,42	13,3	71913	1
	Téra	0,039	0,0	2,79	8,7	179576	4
1994	Ganzourgou	0,169	3,6	6,4	51	59234	4
	Gnagna	0,125	878,7	4,0	25	79519	5
	Gourma	0,162	0,6	4,9	10	110557	5
	Kouritenga	0,13	1903,2	5,8	36	53184	5
	Namentenga	0,218	434,8	5,7	21	53185	4
	Sanmatenga	0,141	57,9	2,5	29	135630	5
	Seno	0,166	271,0	3,2	11	118780	5
	Soum	0,67	87,8	3,4	22	125882	4
	Kollo	0,165	0,2	1,2	18	151390	5
	Say	0,154	0,3	1,9	15	94064	5
	Téra	0,104	0,0	3,1	11	216058	5
2004	Ganzourgou	0,084	3,4	7,2	51,8	57141	1
	Gnagna	0,086	762,9	4,7	27,0	78457	2
	Gourma	0,124	8,4	5,3	11,0	67074	1
	Kouritenga	0,04	1458,8	6,1	37	60300	1
	Namentenga	0,119	354,6	6,0	23	60300	1
	Sanmatenga	0,062	62,9	3,4	32	99563	2
	Seno	0,062	21,6	3,9	12	127966	1
	Soum	0,074	56,2	3,9	26	174117	5
	Kollo	1,071	0,2	2,0	18	142652	3
	Say	0,82	0,1	2,0	17	197957	3
	Téra	0,069	0,1	3,5	12	337622	4

Tableau I.3 Indicateurs économiques : Rendement des cultures céréalières (RENDT), Production par habitant (PROD_CPT), Revenu perçu de la vente des produits d'élevage (REV_ÉL), Revenu sur les cultures de rente (REV_RENTE), Taux de couverture des besoins céréalier (TCBC) Revenu sur les cultures vivrières (REV_AG)

Années	Provinces	RENDT	PROD_CPT	TCBC	REV_AG	REV_RENTE	REV_ÉL
1984	Ganzourgou	383	131	69	0,8	0,8	0,8
	Gnagna	1480	50	26	0,8	0,1	0,5
	Gourma	865	207	109	1,0	0,2	0,7
	Kouritenga	705	118	62	0,8	0,1	0,6
	Namentenga	429	69	36	1,2	0,1	0,4
	Sanmatenga	375	188	99	0,8	1,1	0,2
	Seno	449	277	146	1,2	0,2	0,3
	Soum	156	65	34	1,0	0,2	0,1
	Kollo	378	404	168	0,7	0,1	0,2
	Say	278	225	203	1,2	0,2	0,3
	Téra	225	488	257	1,0	0,2	0,2
	Téra	225	488	257	1,0	0,2	0,2
1994	Ganzourgou	998	130	68	1,0	1,0	1,0
	Gnagna	1268	248	131	0,9	0,0	0,6
	Gourma	1201	426	224	1,1	0,3	0,8
	Kouritenga	862	147	78	0,9	0,0	0,7
	Namentenga	947	203	107	1,3	0,2	0,5
	Sanmatenga	731	518	273	1,3	0,3	0,4
	Seno	583	289	152	1,1	0,3	0,2
	Soum	800	226	119	0,9	1,2	0,3
	Kollo	311	306	128	0,7	0,2	0,2
	Say	672	348	130	1,3	0,2	0,4
	Téra	380	313	165	1,1	0,3	0,2
	Téra	380	313	165	1,1	0,3	0,2
2004	Ganzourgou	1208	191	101	0,9	0,9	0,9
	Gnagna	898	255	134	1,1	0,1	0,8
	Gourma	981	233	123	0,8	0,1	0,5
	Kouritenga	1190	269	142	0,9	0,0	0,7
	Namentenga	1156	361	190	1,3	0,2	0,5
	Sanmatenga	603	191	101	0,9	1,2	0,3
	Seno	310	124	65	1,2	0,2	0,3
	Soum	264	107	56	1,0	0,2	0,1
	Kollo	576	398	166	0,8	0,2	0,2
	Say	587	547	166	1,2	0,2	0,4
	Téra	567	399	210	1,0	0,3	0,2
	Téra	567	399	210	1,0	0,3	0,2

Tableau I.4 Indicateurs de disponibilité de l'eau : Quantité d'eau par habitant (QTÉ_HB), Déficit d'écoulement (DEFICIT_ÉCOUL), Nombre de forage (NBRE_FRG), Taux de couverture des besoins en eau (TCB_EAU) Débit des forges (DÉBIT_FG), Niveau statique (N_STATIQUE), Recharge des forages (RECHARGE).

<i>Années</i>	<i>Provinces</i>	<i>EAU_HBT</i>	<i>DÉFICIT_EC</i>	<i>TCB_EAU</i>	<i>DÉBIT_FG</i>	<i>NIV_STATIQ</i>	<i>RECHARGE</i>
1984	Ganzourgou	177	187	11	2,5	12	2
	Gnagna	16539	1746	54	2,8	16	2
	Gourma	27	29	4	2,8	10	2
	Kouritenga	443	5090	14	2,9	8	4
	Namentenga	798	765	23	2,6	13	2
	Sanmatenga	93	98	39	1,9	16	2
	Seno	219	210	16	2	15	2
	Soum	590	565	8	3	14	3
	Kollo	59	61	17	2	10	2
	Say	21	20	9	3,5	10	2
	Téra	17	16	19	2	9	3
1994	Ganzourgou	192	153	23	3,8	15	
	Gnagna	18466	151	61	3,4	18	3
	Gourma	30	192	59	4,5	12	4
	Kouritenga	473	273	60	4,2	10	3
	Namentenga	810	182	54	3,8	15	2
	Sanmatenga	122	210	47	3,4	18	2
	Seno	237	385	23	2,7	17	5
	Soum	670	517	28	2,5	16	2
	Kollo	67	14	50	2,9	11	2
	Say	22	34	42	4,4	12	3
	Téra	19	85	27	3	12	3
2004	Ganzourgou	187	178	86	3,1	11	4
	Gnagna	17466	375	59	3,5	17	3
	Gourma	29	218	76	3,9	11	4
	Kouritenga	509	323	91	4	9	3
	Namentenga	765	221	84	3	14	4
	Sanmatenga	98	246	16	2,6	17	3
	Seno	210	454	32	2	16	2
	Soum	565	587	48	3	13	4
	Kollo	61	16	52	2,5	10	4
	Say	21	38	50	3	11	2
	Téra	16	97	36	2,5	10	2

Tableau I.5 Indicateurs sociaux : Pauvreté (PAUVTÉ), Taux de scolarité (SCOLA), Taux d'alphabétisation (ALPH), Couverture en santé et accroissement de population et personne en charge (SOCIO)

<i>Année</i>	<i>Provinces</i>	<i>PAUVRETÉ</i>	<i>SCOLA</i>	<i>ALPH</i>	<i>ACCRS</i>	<i>PERS_CHARG</i>	<i>TCS</i>
1984	Ganzourgou	51	44,6	20,0	2,0	2,7	53,7
	Gnagna	48	29,1	20,0	2,7	2,9	52,0
	Gourma	48	39,8	17,1	3,1	2,3	52,6
	Kouritenga	48	51,5	17,1	2,5	2,2	53,3
	Namentenga	52	34,5	20,0	3,4	2,4	53,9
	Sanmatenga	47	26,5	17,1	5,0	2,8	47,3
	Seno	47	31,4	17,1	3,4	2,9	50,8
	Soum	52	43,0	17,1	7,4	2,2	52,7
	Kollo	46	45,6	11,6	45,4	3,5	52,6
	Say	47	39,3	11,6	18,4	3,5	50,6
	Téra	67	31,6	11,6	45,4	3,5	49,6
1994	Ganzourgou	51	45,4	20,8	2,4	2,6	53,8
	Gnagna	46	30,9	21,8	3,8	2,7	52,7
	Gourma	46	43,6	20,9	3,9	2,3	52,7
	Kouritenga	51	55,3	20,9	3,3	2,2	53,5
	Namentenga	58	35,4	20,9	3,7	2,3	53,9
	Sanmatenga	42	29,4	20,0	5,5	2,9	47,4
	Seno	42	35,2	20,9	4,1	2,9	50,9
	Soum	58	45,8	19,9	7,1	2,3	52,8
	Kollo	44	47,6	13,6	45,3	3,5	51,7
	Say	42	41,3	13,6	18,3	3,5	49,7
	Téra	63	34,3	14,3	46,2	3,5	53,8
2004	Ganzourgou	58	46,4	21,8	3,2	2,5	53,7
	Gnagna	40,9	35,0	25,0	5,0	3,0	53,0
	Gourma	40,9	43,5	20,8	4,0	2,3	52,7
	Kouritenga	55,1	56,2	21,8	4,2	2,1	53,4
	Namentenga	34	36,3	21,8	4,5	2,2	53,8
	Sanmatenga	41,3	30,3	20,9	5,8	2,8	47,5
	Seno	41,3	36,1	21,8	5,0	2,8	50,9
	Soum	34	47,7	21,8	9,1	2,1	52,8
	Kollo	38	50,3	16,3	47,0	3,4	48
	Say	56	44,0	16,3	20,0	3,4	46,7
	Téra	61	36,3	16,3	47,0	3,4	45,7